Bruce Rosenblum

Fred Kuttner

O enigma quântico

O encontro da física com a consciência

"Sem recorrer a uma equação sequer, Rosenblum e Kuttner conseguem transmitir grande parte da extraordinária mecânica quântica."

N. David Mermin, professor emérito da Universidade Cornell

Bruce Rosenblum e Fred Kuttner

O enigma quântico

O encontro da física com a consciência

Tradução:
George Schlesinger

Revisão técnica:
Alexandre Cherman
Astrônomo da Fundação Planetário/RJ

Dedicamos nosso livro à memória de John Bell, talvez o mais importante teórico quântico da segunda metade do século XX. Seus textos, palestras e conversas pessoais nos inspiraram.

"Não é bom saber o que vem depois do quê, mesmo que não necessariamente Fapp? [Fapp é a sugestão de Bell para abreviatura de '*for all practical purposes*' – 'para todos os propósitos práticos'.] Suponha, por exemplo, que se descobrisse que a mecânica quântica resiste a uma formulação precisa. Suponha que, ao tentar uma formulação além de Fapp, encontrássemos um dedo imovível apontando obstinadamente para fora do tema, para a mente do observador, para as escrituras hindus, para Deus ou mesmo apenas para a Gravitação? Isso não seria muito, muito interessante?"

JOHN BELL

Sumário

Prefácio

1. Einstein o chamou de “fantasmagórico” – E eu gostaria de ter sabido

2. A visita a Eug Ahne Poc: Uma parábola quântica

3. Nossa visão de mundo newtoniana: Uma lei universal do movimento

4. Todo o resto da física clássica

Olá, mecânica quântica

5. Como o quantum foi *forçado* para dentro da física

6. A equação de Schrödinger: A nova lei universal do movimento

7. O experimento da dupla fenda: O problema do observador

8. Nosso esqueleto no armário

9. Um terço da nossa economia

10. Maravilhosa, maravilhosa Copenhague

11. O controverso gato de Schrödinger

12. Buscando um mundo real: EPR

13. Ações fantasmagóricas: Teorema de Bell

14. Metafísica experimental

15. O que está acontecendo? Interpretando o enigma quântico

16. O mistério da consciência

17. O encontro do mistério com o enigma

18. Consciência e o cosmo quântico

Leituras sugeridas

Agradecimentos

Índice remissivo

Prefácio

A MECÂNICA QUÂNTICA TEM um sucesso impressionante. Nem uma única previsão da teoria jamais esteve errada. Um terço da nossa economia depende de produtos baseados nela. No entanto, a mecânica quântica também exibe um enigma. Ela nos diz que a realidade física é criada pela observação, e que tem “ações fantasmagóricas” que influenciam instantaneamente eventos distantes entre si – sem nenhuma força física envolvida. Vista da perspectiva humana, a mecânica quântica é a física encontrando a consciência.

Nosso livro descreve os fatos experimentais absolutamente inquestionáveis e a explicação aceita desses fatos pela teoria quântica. Discutimos as interpretações rivais hoje existentes, e como cada uma encontra a consciência. Felizmente, o enigma quântico pode ser explorado profundamente em linguagem não técnica. O mistério apresentado pela mecânica quântica, que os físicos chamam de “problema quântico da medição”, aparece de imediato no experimento quântico mais simples.

Nos últimos anos, investigações nos alicerces, e nos mistérios, da mecânica quântica se multiplicaram. Fenômenos quânticos são cada vez mais visíveis em campos que vão da engenharia de computação à biologia e à cosmologia. Esta segunda edição inclui avanços recentes tanto em termos de compreensão quanto de aplicações. O uso do livro em grandes salas de aula e pequenos seminários nos deu a possibilidade de aprimorar o texto – um benefício que também se valeu das respostas dos leitores, de outros instrutores que utilizaram a obra e de comentários de resenhistas. Pretendemos expandir e atualizar a cobertura de certos tópicos no site do livro: www.quantumenigma.com.

1. Einstein o chamou de “fantasmagórico”
E eu gostaria de ter sabido

> Pensei sobre o problema quântico cem vezes mais do que sobre a teoria da relatividade geral.
>
> ALBERT EINSTEIN

> Não posso acreditar seriamente [na teoria quântica] porque … a física deve representar uma realidade no tempo e no espaço, livre de quaisquer ações fantasmagóricas a distância.
>
> ALBERT EINSTEIN

NUM SÁBADO NA DÉCADA de 1950 eu estava visitando amigos em Princeton, e nosso anfitrião perguntou a seu genro, Bill Bennett, e a mim (Bruce) se gostaríamos de fazer uma visita a seu amigo Albert Einstein. Dois fascinados estudantes de pós-graduação em física logo estavam esperando na sala de estar de Einstein quando ele desceu de chinelos e moletom. Lembro-me do chá com biscoitos, mas não de como a conversa começou.

Logo Einstein perguntou sobre nosso curso de mecânica quântica. Ele aprovou o fato de nosso professor ter escolhido o livro de David Bohm como texto básico e nos perguntou se estávamos gostando do tratamento dado por Bohm à estranheza que a teoria quântica implicava. Não fomos capazes de responder. Tinham nos dito para pular essa parte do livro e nos concentrarmos na seção intitulada “A formulação matemática da teoria”. Einstein persistiu em explorar nossos pensamentos sobre o que a teoria realmente significava. Mas os assuntos que lhe interessavam não nos eram familiares. Nossos cursos focalizavam o *uso* da teoria, não seu significado. Nossas respostas à sua sondagem decepcionaram Einstein, e essa parte da nossa conversa terminou aí.

Muitos anos se passariam até que eu entendesse a preocupação de Einstein com as misteriosas implicações da teoria quântica. Eu não sabia que nos idos de 1935 ele havia surpreendido os responsáveis pelo desenvolvimento da teoria ao assinalar que ela requeria que uma observação num local influenciasse *instantaneamente* o que acontecia ao longe *sem envolver nenhuma força física*. E zombava disso como sendo uma "ação fantasmagórica" que não podia realmente existir.

Einstein sentia-se incomodado pela alegação da teoria de que, se você observasse um pequeno objeto, digamos, um átomo, presente em algum lugar, era o *fato de você olhar* que fazia com que ele estivesse lá. Será que isso se aplica a coisas grandes? Em princípio, sim. Ridicularizando a teoria quântica, Einstein perguntou certa vez a um colega físico, apenas *parcialmente* em tom de brincadeira, se ele acreditava que a Lua estava lá só quando olhava para ela. Segundo Einstein, se você levasse a teoria quântica a sério, negaria a existência de um mundo físico real independente da sua observação. Essa é uma acusação séria. A teoria quântica não é simplesmente uma entre muitas teorias na física. É o arcabouço sobre o qual *toda* a física em última análise se assenta.

NOSSO LIVRO se concentra nas misteriosas implicações da teoria quântica que incomodaram Einstein, desde sua proposta inicial do quantum, em 1905, até sua morte meio século mais tarde. Porém, durante anos após aquela noite com Einstein pouco pensei sobre a esquisitice quântica, aquilo que os físicos chamam de "o problema da medição". Como estudante de pós-graduação, ficava intrigado com a correlata "dualidade onda-partícula". Trata-se do paradoxo de que, olhando de uma maneira, podia-se demonstrar que um átomo é um objeto compacto, concentrado em um único lugar. No entanto, olhando de maneira diferente, podia-se demonstrar exatamente *o contrário*. Podia-se mostrar que o átomo *não* é um objeto compacto, que é uma onda espalhada sobre uma larga região. Essa contradição me intrigava, mas eu assumia que se passasse algumas horas pensando no assunto veria tudo com clareza – da maneira como meus professores pareciam ver. Como aluno de pós-graduação, tinha coisas mais

urgentes a fazer. Minha tese de doutorado envolvia montes de teoria quântica, mas, como a maioria dos físicos, eu tinha pouca preocupação com seu significado mais profundo. Na época, eu não percebia que ela ia muito além da mera "dualidade onda-partícula".

Depois de uma década como pesquisador de física industrial e gerente de pesquisa, entrei no corpo docente da Universidade da Califórnia em Santa Cruz (UCSC). Lecionando num curso de física dirigido a alunos de artes liberais, os mistérios da mecânica quântica me intrigaram. Uma conferência de uma semana na Itália sobre os fundamentos da mecânica quântica me fisgou para o tema sobre o qual eu estava despreparado para conversar naquela longínqua noite em Princeton.

QUANDO EU (FRED) me encontrei com a mecânica quântica no meu penúltimo ano no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), escrevi a equação de Schrödinger ocupando toda a página do meu caderno, empolgado com aquela fórmula que governava tudo no Universo. Mais tarde fiquei intrigado com a afirmação quântica de que o polo norte de um átomo pode apontar em mais de uma direção ao mesmo tempo. Depois de me debater com isso por algum tempo, desisti, imaginando que entenderia quando aprendesse mais.

Para minha dissertação de doutorado fiz uma análise quântica de sistemas magnéticos. Eu tinha ficado à vontade no *uso* da teoria quântica, mas não dispunha de tempo para pensar sobre o que ela *significava*. Estava ocupado demais tentando publicar trabalhos acadêmicos e conseguir meu doutorado. Depois de trabalhar em algumas empresas de alta tecnologia, entrei para o corpo docente de física da UCSC.

QUANDO NÓS DOIS começamos a explorar a fronteira onde a física se encontra com a filosofia especulativa, nossos colegas físicos ficaram surpresos. Nossas áreas de pesquisa anteriores eram bastante convencionais, até mesmo práticas. (Há mais informações sobre nossos históricos em pesquisa industrial e

acadêmica, bem como dados para contato, no site do nosso livro: www.quantumenigma.com.)

O esqueleto no armário da física

A teoria quântica tem um sucesso impressionante. Nem uma única de suas previsões jamais se mostrou errada. Um terço da nossa economia depende de produtos baseados nela. No entanto, a visão de mundo exigida pela teoria quântica é não só mais estranha do que poderíamos supor, mas mais estranha do que *conseguimos* supor. Vamos ver por quê.

A maioria de nós compartilha certas intuições do senso comum. Um único objeto não pode estar ao mesmo tempo em dois lugares distantes entre si. E, seguramente, o que alguém decide fazer aqui não pode afetar instantaneamente o que acontece em algum lugar distante. E será que é preciso dizer que existe um mundo real "lá fora", quer olhemos para ele ou não? A mecânica quântica desafia cada uma dessas intuições. J.M. Jauch nos diz: "Para muitos físicos mais cuidadosos, [o significado mais profundo da mecânica quântica] tem permanecido uma espécie de esqueleto no armário."

COMEÇAMOS ESTE CAPÍTULO falando sobre a preocupada inquietude de Einstein com a teoria quântica. O que é essa teoria? A teoria quântica foi desenvolvida no começo do século XX para explicar a *mecânica*, o mecanismo, que governa o comportamento dos átomos. Antes disso, havia sido descoberto que a energia de um objeto só podia variar numa quantidade discreta, um *quantum*, daí o termo "mecânica do quantum", ou "mecânica quântica", que abrange tanto as efetivas observações experimentais como a *teoria* quântica que as explica.

A teoria quântica está na base de toda ciência natural, desde a química até a cosmologia. Precisamos dela para entender por que o Sol brilha, como televisores produzem imagens, por que a grama é verde e como o Universo se desenvolveu a partir do Big Bang. A tecnologia moderna baseia-se em dispositivos projetados com a teoria quântica.

A física pré-quântica, a “mecânica *clássica*” ou “física clássica”, às vezes chamada de “física newtoniana”, geralmente é uma excelente aproximação para objetos muito maiores que moléculas e costuma ser mais simples de usar do que a teoria quântica. Mas é apenas uma aproximação e não funciona, absolutamente, para os átomos dos quais tudo é feito. Mesmo assim, a física clássica é básica para nosso saber convencional, nossa visão de mundo newtoniana. No entanto, sabemos agora, essa visão de mundo clássica é fundamentalmente falha.

Desde tempos antigos os filósofos apresentaram especulações esotéricas sobre a natureza da realidade física. Antes da mecânica quântica as pessoas tinham a opção lógica de rejeitar tais teorias e ater-se a uma visão de mundo clara e direta, própria do senso comum. Hoje, porém, à luz dos fatos demonstrados em experimentos quânticos, a visão de senso comum já não é mais uma opção lógica.

Pode uma visão de mundo sugerida pela mecânica quântica ter uma relevância que vá além da ciência? Consideremos outras perguntas. Será que o fato de Copérnico ter negado que a Terra fosse o centro do cosmo teve uma relevância que ultrapassou a ciência? E quanto à teoria da evolução de Darwin? A relevância da mecânica quântica é, num certo sentido, mais imediata que a das ideias de Copérnico ou de Darwin, que lidam com o muito distante no espaço ou no tempo. A teoria quântica trata do aqui e agora e encontra-se até mesmo com a essência da humanidade, a nossa consciência.

Por que, então, a teoria quântica não teve o impacto intelectual e social das outras duas? Talvez porque elas sejam mais fáceis de compreender – e *muito* mais fáceis de acreditar. Pode-se resumir grosseiramente as implicações de Copérnico e Darwin em poucas frases. Pelo menos para a mente moderna, essas ideias parecem razoáveis. Tente resumir as implicações da teoria quântica, e o que você obtém soa místico.

De qualquer maneira, arriscamo-nos a fazer um resumo aproximado. A teoria quântica nos diz que a observação de um objeto pode influenciar instantaneamente o comportamento de outro objeto a uma enorme distância –

mesmo que não haja força física ligando os dois. São as influências que Einstein rejeitou como "ações fantasmagóricas", mas que agora foi demonstrado que existem. A teoria quântica também nos diz que um objeto pode estar em dois lugares ao mesmo tempo. Sua existência num lugar determinado onde é encontrado torna-se realidade *apenas com sua observação*. A teoria quântica nega a existência de um mundo fisicamente real independente da sua observação. (Veremos que "observação" é um conceito traiçoeiro e controverso.)

Estranhos fenômenos quânticos podem ser demonstrados *diretamente* apenas para objetos pequenos. A física clássica descreve o comportamento razoável de coisas grandes com uma aproximação *extremamente* boa. Mas as coisas grandes são compostas de coisas pequenas. Como visão de mundo, a física clássica simplesmente não funciona.

A física clássica explica o mundo bastante bem; é apenas com os "detalhes" que ela não consegue lidar. A física quântica lida com os "detalhes" perfeitamente; é só o mundo que ela não consegue explicar. Dá para entender por que Einstein estava perturbado.

ERWIN SCHRÖDINGER, um dos fundadores da teoria quântica moderna, contou sua agora famosa história do gato para enfatizar que a teoria quântica diz algo "absurdo". O gato não observado de Schrödinger, segundo a teoria quântica, está simultaneamente morto *e* vivo – até que observá-lo *faça com que* esteja ou morto ou vivo. E aqui está algo ainda mais difícil de aceitar: encontrar o gato morto criaria a história de ele desenvolver *rigor mortis*; achá-lo vivo criaria uma história de ele desenvolver fome. *Recuando no tempo*.

O enigma apresentado pela teoria quântica tem desafiado os físicos há oito décadas. Talvez o conhecimento e os talentos de físicos não nos qualifiquem *com exclusividade* para sua compreensão. Nós, físicos, poderíamos portanto abordar o problema com modéstia, ainda que achemos isso difícil.

Notavelmente, a essência do enigma quântico pode ser apresentada em sua totalidade sem envolver muito conhecimento de física. Poderia alguém não

sobrecarregado com anos de treinamento no *uso* da teoria quântica ter uma nova compreensão? Afinal, foi uma criança que mostrou que o imperador estava sem roupas.

Controvérsia

Nosso livro teve origem em um curso de física amplo para estudantes de artes liberais que em suas últimas semanas focalizava os mistérios da mecânica quântica. Quando eu (Bruce) propus inicialmente essas aulas numa reunião de departamento, o foco final levou um membro do corpo docente a objetar:

> Embora o que você está dizendo seja correto, apresentar esse material a não cientistas é o equivalente intelectual de permitir que crianças brinquem com armas carregadas.

O professor que fez a objeção, um bom amigo, tinha uma preocupação válida: algumas pessoas, vendo a sólida ciência da física ligada ao mistério da mente consciente, poderiam ficar suscetíveis a todo tipo de absurdos pseudocientíficos. Minha resposta foi que ensinaríamos “segurança com armas”: enfatizaríamos o método científico. O curso foi aprovado. Atualmente Fred leciona essas aulas, que se tornaram as mais populares de nosso departamento.

VAMOS DEIXAR CLARO de saída que a referência ao “encontro com a consciência” no título não implica nenhum tipo de “controle da mente”; que seus pensamentos sozinhos possam controlar *diretamente* o mundo físico. Será que os resultados indiscutíveis de experimentos quânticos que descrevemos dão a entender algum misterioso papel para a consciência no mundo *físico*? Essa é uma questão calorosamente debatida que surge numa fronteira da disciplina da física.

Como nosso livro se concentra nessa fronteira, onde surge o enigma quântico, trata-se de uma obra necessariamente controversa. No entanto, absolutamente *nada* do que dizemos sobre a mecânica quântica em si é discutível. É o mistério que esses resultados implicam para *além* da física que suscita controvérsia. Para muitos físicos, é melhor que não se fale sobre essa desconcertante estranheza. Físicos (inclusive nós mesmos) podem se sentir desconfortáveis com sua disciplina ao encontrar algo tão “não físico” como a

consciência. Embora os fatos quânticos não estejam em discussão, o significado *por trás* desses fatos, aquilo que a mecânica quântica nos conta sobre nosso mundo, é calorosamente discutido. Abordá-lo num departamento de física, especialmente num curso de física para uma plateia não técnica, incorrerá na desaprovação de alguns professores. (Os físicos, é claro, não estão sozinhos em seu desconforto com a questão da consciência surgindo misteriosamente na discussão de fenômenos físicos. Ela pode desafiar a visão de mundo de qualquer um de nós.)

Um biógrafo de Einstein nos conta que nos idos de 1950 um professor do departamento de física que não tivesse estabilidade acadêmica colocaria sua carreira em risco se mostrasse qualquer interesse nas estranhas implicações da teoria quântica. Os tempos estão mudando. A exploração das questões fundamentais da mecânica quântica, que não podem evitar o encontro com a consciência, está aumentando nos dias de hoje e se estende além da física para a psicologia, a filosofia e até mesmo a engenharia de computação.

Como a teoria quântica funciona perfeitamente para todos os propósitos *práticos*, alguns físicos negam que exista algum problema. Tal negativa deixa para os fornecedores de pseudociência os aspectos da mecânica quântica que compreensivelmente mais intrigam os não físicos. O filme *Quem somos nós?* é um exemplo de pseudociência que lamentamos. (Se você não está familiarizado com o filme, veja nosso comentário no capítulo 15.) O *verdadeiro* enigma quântico é mais bizarro e mais profundo do que as “filosofias” que tais tratamentos apoiam. Compreensivelmente, o real mistério quântico requer um pouco mais de esforço mental, mas vale a pena.

NUMA CONFERÊNCIA DE FÍSICA à qual compareceram várias centenas de físicos (inclusive nós dois), uma discussão irrompeu durante o debate após uma das palestras. (O acalorado debate que tomou conta do auditório foi relatado no *New York Times* em dezembro de 2005.) Um dos participantes argumentou que, por causa da sua estranheza, a teoria quântica tinha um problema. Outro negou vigorosamente que houvesse um problema, acusando o primeiro de “não ter

entendido a questão”. Um terceiro se intrometeu para dizer: “Nós simplesmente somos jovens demais. Devemos esperar até 2200, quando a mecânica quântica for ensinada no jardim de infância.” Um quarto resumiu a discussão dizendo: “O mundo não é tão real quanto pensamos.” Três desses participantes da discussão têm prêmio Nobel de Física e o quarto é um bom candidato a ganhar.

Essa discussão lembra uma analogia que reflete nossa própria inclinação. Um casal está fazendo terapia conjugal. A esposa diz: “Há um problema no nosso casamento.” O marido discorda, dizendo: “Não há *nenhum* problema no nosso casamento.” O terapeuta sabe quem tem razão.

Interpretando a teoria quântica

Nos últimos vinte anos de sua vida, o questionamento contínuo de Einstein à teoria quântica frequentemente foi desconsiderado como falta de contato seu com a física moderna. Ele de fato estava errado em negar a realidade da "ação fantasmagórica" que descobrira estar sorrateiramente à espreita na teoria quântica. Sua existência, agora chamada de "emaranhamento", foi demonstrada. Não obstante, Einstein hoje é reconhecido como o crítico mais presciente da teoria. Sua constante alegação de que a estranheza não deve ser deixada de lado é refletida pela atual proliferação de loucas interpretações da teoria quântica.

No capítulo 15 descrevemos várias visões e interpretações rivais do que a mecânica quântica está nos dizendo acerca do mundo físico – e, talvez, acerca de nós mesmos. São todas propostas sérias desenvolvidas com extensiva análise matemática. Sugerem alternadamente a criação da realidade física pela observação, a existência de muitos mundos paralelos com cada um de nós em cada um deles, a interconectividade universal, o futuro afetando o passado, uma realidade além da realidade física e até mesmo um questionamento do livre-arbítrio.

Na fronteira onde a física não obriga mais a um consenso, o significado da teoria quântica é controverso. A maioria das interpretações do que está se passando mostra como a questão da consciência pode ser ignorada para todos os propósitos *práticos*. Entretanto, ao explorar os alicerces da teoria, a maioria dos especialistas contemporâneos admite um mistério, que geralmente encontra a consciência. Embora seja nossa experiência mais íntima, a consciência é mal definida. É algo com que a física não consegue lidar, mas que não pode ignorar.

Frank Wilczek, laureado com o Nobel de Física, recentemente comentou:

> A literatura relevante [sobre o significado da teoria quântica] é famosa por ser contenciosa e obscura. Acredito que assim permanecerá até que alguém elabore, dentro do formalismo da mecânica quântica, um "observador", isto é, uma entidade-modelo cujos estados correspondam a uma caricatura

> reconhecível da consciência quântica. … Esse é um projeto formidável, que se estende para bem além do que é convencionalmente considerado física.

Ao apresentar os fatos indiscutíveis e enfatizar o enigma com que eles nos desafiam, não propomos uma solução para esse enigma. Em vez disso, oferecemos aos leitores uma base para suas próprias ponderações. Singularmente, essa questão controversa pode ser entendida com pouco conhecimento prévio de física.

2. A visita a Eug Ahne Poc
Uma parábola quântica

Se você está querendo exagerar, então se empanturre de uma vez.

G.I. GURDJIEFF

ALGUNS CAPÍTULOS VÃO se passar antes de encontrarmos o enigma apresentado pela mecânica quântica. Mas comecemos dando uma olhada no paradoxo. A tecnologia de hoje nos limita a exibir o enigma quântico em objetos pequenos. No entanto, supostamente, a mecânica quântica se aplica a tudo.

Assim, começamos contando uma história na qual um físico visita Eug Ahne Poc, uma terra com tecnologia mágica que permite a demonstração de algo *parecido* com o enigma quântico, mas com objetos grandes – um homem e uma mulher, em vez de átomos. Nossa parábola conta algo impossível no mundo real, mas observe o que deixa perplexo nosso visitante em Eug Ahne Poc. Sua *perplexidade* é o sentido da nossa parábola. Em capítulos posteriores você deverá experimentar uma perplexidade semelhante.

Prólogo do nosso visitante muito seguro de si a Eug Ahne Poc

Deixem-me contar por que estou me arrastando pesadamente para subir esta trilha íngreme. Como a mecânica quântica pode fazer a natureza parecer quase mística, algumas pessoas podem ser erroneamente levadas a aceitar tolices sobrenaturais.

Um mês atrás eu estava na Califórnia com amigos geralmente sensatos. As pessoas ali, no entanto, parecem mais suscetíveis a absurdos quânticos. Meus amigos falaram de Rhob, em Eug Ahne Poc, uma aldeia nas montanhas Hima-Urais. Eles alegaram que esse xamã era capaz de exibir fenômenos do tipo quântico com objetos grandes. Isso é ridículo, é claro!

Quando lhes expliquei que essa demonstração é impossível, eles me acusaram de ser um cientista de mente fechada. Fui desafiado a investigar, e um deles, um bilionário da área de informática, ofereceu-se para financiar a minha viagem. Embora meus colegas do departamento de física tenham insistido comigo para que não perdesse tempo numa caçada inútil, acredito que cientistas de espírito público devam despender algum esforço investigando noções injustificadas para impedir sua propagação. Então, aqui estou.

Vou olhar essa coisa toda com a mente completamente aberta. Então derrubo todo esse absurdo quando voltar para a Califórnia. Mas enquanto estiver em Eug Ahne Poc serei discreto. Esse truque do xamã provavelmente é parte da religião local.

A trilha vai ficando menos íngreme e se alarga, terminando repentinamente numa modesta praça. Nosso visitante chegou a Eug Ahne Poc. Está aliviado em ver que os arranjos de viagem feitos pelos amigos deram certo. Sua chegada é

esperada. Ele é calorosamente recebido por Rhob e um pequeno grupo de aldeões.

- Saudações, Curioso Questionador, Cuidadoso Experimentador. Você é um visitante bem-vindo à nossa aldeia.
- Obrigado, muito obrigado. Agradeço a calorosa recepção.
- Estamos felizes em tê-lo conosco. Entendo que você veio numa missão de busca da verdade. Como é americano, tenho certeza de que a quer rapidamente. Tentaremos satisfazê-lo, mas, por favor, tenha compreensão com os nossos modos pouco apressados.
- Oh, eu realmente agradeço. Espero que eu não seja um problema.
- De maneira nenhuma. Entendo que vocês, físicos, apenas recentemente – no século passado, para ser mais preciso – aprenderam algumas das verdades mais profundas do nosso Universo. Mas a sua tecnologia os limita a trabalhar com objetos pequenos e simples. A nossa "tecnologia", se quiser chamá-la assim, pode fornecer uma demonstração com as entidades mais complexas.
- (COM ENTUSIASMO MAS DESCONFIANÇA) Estou ansioso para ver isso.
- Eu fiz os arranjos necessários. Você fará uma pergunta apropriada, e a resposta à sua pergunta lhe será então revelada. Acredito que o procedimento de fazer uma pergunta e ter uma resposta revelada é muito parecido com o que vocês, cientistas, chamam de "fazer um experimento". Deseja ter essa experiência?
- (COM AR INTRIGADO) Bem, sim, quero…
- Vou preparar a situação para permitir o experimento.

Rhob se move em direção a duas pequenas choupanas separadas por uma distância de mais ou menos dez metros. Entre as choupanas se encontram um rapaz e uma moça de mãos dadas.

Arrumar a situação, “preparar o experimento” como vocês diriam, deve ser feito sem observação. Por favor, ponha este capuz.

Nosso visitante cobre a cabeça com o macio capuz negro. Após alguns instantes, Rhob continua:

O experimento está agora preparado. Por favor, remova o capuz. Numa dessas choupanas há um casal, um homem e uma mulher juntos. A outra choupana está vazia. O seu primeiro “experimento” é determinar qual choupana contém o casal e qual está vazia. Faça isso com uma pergunta apropriada.

Tudo bem, em qual choupana está o casal e qual choupana está vazia?

Ótimo, perfeito!

Rhob faz um sinal a um aprendiz, que abre a porta da choupana da direita para revelar o rapaz e a moça de braços dados, sorrindo timidamente. Em seguida, abre a porta da outra choupana, mostrando que está vazia.

Note, meu amigo, que você recebeu uma resposta *apropriada* para a sua pergunta. O casal de fato estava numa das choupanas. E a outra estava, é claro, vazia.

(NÃO IMPRESSIONADO, MAS TENTANDO SER POLIDO) Hã, hã, sim. Percebo.

Mas eu entendo que a reprodutibilidade é crucial para os cientistas. Então, repetiremos o experimento.

O procedimento é repetido mais seis vezes para nosso visitante. Às vezes o casal está na choupana da direita, às vezes na da esquerda. Como nosso visitante está claramente ficando entediado, Rhob interrompe as demonstrações e explica:

(UM TANTO ALEGRE) Note, meu amigo! O fato de você perguntar sobre o paradeiro do *casal* fez com que o homem e a mulher ficassem juntos, numa única choupana.

(ABORRECIDO POR TER VIAJADO PARA TÃO LONGE PARA VER UMA DEMONSTRAÇÃO APARENTEMENTE TRIVIAL, NOSSO VISITANTE ESTÁ ACHANDO DIFÍCIL NÃO OFENDER) Minhas *perguntas* fizeram o casal estar numa choupana ou na outra? Bobagem! O lugar onde você os colocou enquanto eu estava de capuz é que provocou isso. Ah, mas peço desculpas, isso não vem ao caso. Muito obrigado pela sua demonstração. Mas está ficando tarde; preciso descer a montanha.

Não, sou eu quem deve pedir desculpas. Devo me lembrar de que o intervalo de atenção dos americanos é muito curto. Ouvi dizer que na verdade vocês escolhem os líderes de sua nação com base em uma série de apresentações de trinta segundos numa pequena parede de vidro.

Por favor, temos agora um segundo experimento. Você fará uma pergunta diferente. Fará uma pergunta que faça com que o homem e a mulher estejam em choupanas separadas.

Bem, sim, mas eu realmente preciso descer…

Sem esperar que nosso visitante termine, Rhob lhe entrega o capuz e, dando de ombros, nosso visitante cobre a cabeça. E Rhob fala.

Por favor, tire o capuz. Faça uma *nova* pergunta, que determine em qual choupana está o homem e em qual está a mulher.

Tudo bem, tudo bem, em qual choupana está o homem e em qual está a mulher?

Desta vez Rhob faz um sinal aos aprendizes para que abram as choupanas ao mesmo tempo. Elas revelam o rapaz na choupana da direita e a moça na da

esquerda, sorrindo um para o outro através da praça.

Perceba! Você recebeu uma resposta apropriada para a nova pergunta que fez, um resultado apropriado para o experimento *diferente* que foi feito. A sua pergunta fez com que o casal *se distribuísse em ambas as choupanas*. Agora mostraremos a reprodutibilidade repetindo esse experimento.

Por favor, preciso ir embora. (AGORA NUM TOM DE VOZ SARCÁSTICO) Reconheço que os seus “experimentos” são todos replicáveis tantas vezes quantas se queira, com resultados igualmente impressionantes.

Oh, realmente *sinto* muito.

(DESCONCERTADO POR SUA PRÓPRIA DESCORTESIA) Oh, não. Sou *eu* que peço desculpas. Ficaria encantado em ver uma repetição desse experimento.

Bem, quem sabe apenas duas ou três vezes?

E a demonstração é repetida três vezes.

Você parece impaciente. Então talvez três vezes seja o suficiente para demonstrar que o fato de você perguntar sobre o paradeiro do homem e da mulher *separadamente* fez com que o casal se *distribuísse* nas duas choupanas. Estamos de acordo?

(ENTEDIADO E DECEPCIONADO, MAS UM TANTO AFETADO) Seguramente concordo que você pode distribuir o casal nas choupanas do jeito que quiser. No entanto, agora realmente preciso ir descendo a montanha. Mas muito, muito obrigado pela…

(INTERROMPENDO) Você não viu ainda a versão *final* destes experimentos. É a parte *crucial* que completa a nossa demonstração. Deixe-me mostrar para você – só duas vezes. Só duas vezes.

(CONDESCENDENDO) Ok, tudo bem, duas vezes.

Nosso visitante veste novamente o capuz.

Por favor, tire o capuz e faça sua pergunta.

Qual pergunta devo fazer?

Ah, meu amigo, agora você tem experiência em ambas as perguntas. Pode fazer qualquer uma delas. Pode escolher qualquer um dos experimentos.

(SEM PENSAR MUITO) Tudo bem, em que choupana está o casal?

Rhob manda abrir a porta da choupana da direita e revela o homem e a mulher de mãos dadas. Manda abrir então a porta da outra choupana, mostrando que está vazia.

(UM POUCO INTRIGADO, MAS NÃO REALMENTE SURPRESO) Hummm…

Perceba que a pergunta que você fez, o experimento que você escolheu, levou o casal a estar junto na mesma choupana. Agora vamos tentar de novo – pela segunda vez –, já que você concordou.

(BASTANTE DISPOSTO) Claro, vamos tentar de novo.

Nosso visitante veste novamente o capuz.

Por favor, tire o capuz e faça qualquer uma das perguntas.

(COM UM TOQUE DE CETICISMO) Ok, desta vez resolvi fazer a outra pergunta: em que choupana está o homem e em que choupana está a mulher?

Rhob manda seus aprendizes abrirem ambas as choupanas ao mesmo tempo, revelando o homem na da direita e a mulher na da esquerda.

Hummm… (À PARTE – UM PENSAMENTO EM VOZ ALTA) Gozado, ele foi capaz de responder à minha pergunta também desta vez. Duas vezes seguidas. Ele não

podia saber qual das duas eu faria.

Perceba, meu amigo, qualquer que seja a pergunta que você escolha fazer, ela é sempre respondida da maneira apropriada. E agora você deseja nos deixar.

Bem, hã… na verdade, eu não me importaria nem um pouco de tentar mais uma vez este último experimento.

Com certeza. Fico encantado com o seu interesse na demonstração de que não importa que pergunta você resolva fazer, ela sempre é respondida da maneira apropriada.

Nosso visitante veste novamente o capuz.

Por favor, tire o capuz e faça qualquer uma das perguntas.

Ok. *Desta* vez, em que choupana está o casal?

Rhob manda abrir a porta da choupana da esquerda, revelando o homem e a mulher juntos. Depois, manda abrir a porta da outra choupana para mostrar que está vazia.

Você deu a resposta apropriada à pergunta que escolhi três vezes seguidas. A sua sorte é impressionante!

Não foi sorte, meu amigo. A observação que você escolheu de livre vontade determinou se o casal estaria junto numa choupana ou separado em duas.

(INTRIGADO) Como é possível? (AGORA ANSIOSO) Podemos tentar mais uma vez?

Claro, se quiser.

A demonstração é repetida, e nosso visitante, cada vez mais intrigado, pede mais e mais repetições. Oito vezes ele vê um resultado condizente com a pergunta que

fez, mas inapropriado à outra pergunta que poderia ter feito.

(NUM APARTE AGITADO) Não consigo acreditar nisso! Por favor, eu gostaria de tentar mais uma vez!

Receio que esteja escurecendo, e é uma descida íngreme. Tenha certeza de que sempre vai obter a resposta apropriada para a pergunta que fizer – apropriada para a situação que a sua pergunta fez existir.

(RESMUNGA, PARECENDO INCOMODADO)

Alguma coisa o está perturbando, meu amigo?

Como você sabia que pergunta eu ia fazer quando colocou as pessoas nas choupanas?

Eu não sabia. Você podia fazer qualquer uma das perguntas.

(AGITADO) Mas, mas… sejamos razoáveis! E se eu tivesse feito a pergunta *não* correspondente a onde o homem e a mulher de fato estavam?

Meu amigo, o grande físico dinamarquês de vocês, Bohr de Copenhague, não ensina que a ciência não precisa fornecer respostas a experimentos não efetivamente realizados?

Ah, sim, mas vamos lá – as suas duas pessoas teriam de estar ou juntas ou separadas imediatamente antes de eu fazer a pergunta.

Vejo o que o está perturbando. Apesar do seu treinamento como físico, e da sua experiência com mecânica quântica no laboratório, você ainda está imbuído da noção de que uma realidade física em particular existe antes de sua escolha do que observar, e antes de sua experiência consciente disso. Aparentemente os físicos acham difícil compreender totalmente a grande verdade que tão recentemente vislumbraram. Mas boa noite, meu amigo. Você viu o que veio ver. Agora deve nos deixar. Tenha uma viagem de volta em segurança montanha abaixo.

(OBVIAMENTE PERPLEXO, AO VIRAR-SE PARA PARTIR) Hã, sim, vou, hã, muito obrigado, muito, muito obrigado, eu, hã, bem… obrigado…

(FALANDO CONSIGO MESMO, ENQUANTO PEGA O RUMO DESCENDO A ÍNGREME TRILHA ROCHOSA) Agora vejamos, deve haver uma explicação razoável. Se eu perguntasse onde o casal estava, ele imediatamente mostrava o casal numa *única* choupana. Mas, se eu escolhesse perguntar onde estavam o homem e a mulher separadamente, ele de imediato mostrava cada um numa choupana. Mas antes de eu perguntar eles deviam estar em uma ou em outra situação? As choupanas eram bem distantes. Como é que ele fazia isso?!

Será que eu era induzido a fazer a pergunta que se encaixasse na distribuição que ele tinha arranjado? Não, eu *sei* que as minhas escolhas foram feitas livremente.

É impossível! Mas eu vi! É mais ou menos como um experimento quântico em que ambas as situações existem ao mesmo tempo, até você ir olhar e ver só uma. Rhob disse: “Experiência consciente.” Mas coisas como a *consciência* não deveriam entrar na física. Em todo caso, a mecânica quântica não se aplica a coisas grandes como pessoas. Bem, é claro que isso não é muito correto. Em princípio, a física quântica se aplica a tudo. Mas só se pode demonstrar esse tipo de coisa com um experimento de interferência. E experimentos de interferência são impossíveis com coisas grandes – para todos os propósitos práticos. Será que eu estava alucinando?

Como é que desmascaro esse Rhob quando chegar de volta à Califórnia? E, ai, meu Deus! Os caras do departamento de física vão fazer perguntas sobre a minha viagem. Ui!

Não existe, é claro, nenhuma Eug Ahne Poc. O que nosso visitante viu é na verdade impossível. Mas em capítulos posteriores veremos que um objeto pode se revelar totalmente num lugar ou, por uma escolha diferente de experimento, distribuído em dois locais, como o casal em Eug Ahne Poc. Você deverá experimentar a mesma perplexidade que nosso visitante.

Demonstrar que uma realidade física é causada pela observação é limitado pela tecnologia atual a coisas muito pequenas. Mas está sendo demonstrado o

tempo todo para objetos cada vez maiores. Dedicaremos um capítulo inteiro à resolução “ortodoxa” da física desse paradoxo, a interpretação de Copenhague da mecânica quântica, com Niels Bohr como seu principal arquiteto. A explicação dada por Bohr não é diferente daquela dada por Rhob em Eug Ahne Poc (“Rhob” é Bohr ao contrário). Posteriormente discutiremos questionamentos modernos à interpretação de Copenhague.

3. Nossa visão de mundo newtoniana
Uma lei universal do movimento

> A natureza e suas leis jaziam ocultas na noite:
> Deus disse: Faça-se Newton! E a luz se fez.
>
> ALEXANDER POPE

A TEORIA QUÂNTICA entra em violento conflito com nossa intuição. Não obstante, os físicos aceitam prontamente a mecânica quântica como a base subjacente de toda a física e, portanto, de toda a ciência. Para entender por quê, consideremos a história.

A postura arrojada de Galileu no século XVII *criou* a ciência em todos os sentidos modernos do termo. E, em algumas décadas, a descoberta de Newton de uma lei universal do movimento tornou-se o modelo para toda explicação racional. A física de Newton levou a uma visão de mundo que hoje molda a forma de pensar de cada um de nós. A mecânica quântica, ao mesmo tempo que se assenta sobre essa forma de pensar, é um desafio para ela.

Galileu insistia que as teorias científicas deviam ser aceitas ou rejeitadas somente com base em testes experimentais. Se a teoria se encaixa ou não na intuição de alguém deve ser irrelevante. Essa máxima desafiava a concepção científica da Renascença, que na verdade era da Grécia antiga. Vamos examinar o problema que Galileu enfrentou na Itália renascentista: a herança da ciência grega.

Ciência grega: suas contribuições e sua falha fatal

Devemos crédito aos filósofos da Grécia antiga por montar o palco para a ciência ao ver a natureza como explicável. Quando os textos de Aristóteles foram redescobertos no século XIII, foram venerados como a sabedoria de uma "Idade de Ouro".

Aristóteles observou que tudo o que acontece é essencialmente movimento de matéria – mesmo, digamos, o brotar de sementes para se transformar em carvalhos. Assim, começou examinando o movimento de objetos *simples*, em que podia iniciar com um pequeno número de princípios fundamentais. Essa é de fato a maneira como fazemos física hoje. Buscamos princípios fundamentais. Porém, o método de Aristóteles para *escolher* princípios fundamentais tornou o progresso impossível. Ele assumia que tais princípios podiam ser percebidos intuitivamente como verdades autoevidentes.

Eis alguns deles. Um objeto material buscava repouso em relação ao centro cósmico, que era "claramente" a Terra. Um objeto caía por causa de seu desejo por esse centro cósmico. Um objeto pesado, com desejo maior, cairia portanto, sem dúvida, mais depressa que um objeto leve. Nos céus perfeitos, por outro lado, os objetos celestes se moviam segundo a mais perfeita das figuras, o círculo. Esses círculos estariam em esferas situadas no próprio centro cósmico, a Terra.

A ciência grega tinha uma falha fatal: *não possuía mecanismo para obrigar o consenso*. Os gregos viam os testes experimentais de conclusões científicas como algo não mais relevante que testes experimentais de posições políticas ou estéticas. Opiniões conflitantes podiam ser motivo de discussões intermináveis.

Os pensadores da Idade de Ouro lançaram a empreitada científica, mas, sem um método para estabelecer alguma concordância, o progresso era impossível. Embora em seu tempo Aristóteles não tenha estabelecido consenso, no fim da

Idade Média suas opiniões tornaram-se o dogma oficial da Igreja, basicamente pelo empenho de Tomás de Aquino.

Tomás de Aquino encaixou a cosmologia e a física de Aristóteles nas doutrinas morais e espirituais da Igreja, criando uma síntese obrigatória. A Terra, onde as coisas caíam, também era o reino do homem moralmente “caído”. O Céu, onde as coisas se moviam em círculos perfeitos, era o reino de Deus e de Seus anjos. No ponto mais baixo do Universo, no centro da Terra, estava o Inferno. Quando, no começo da Renascença, foi usado por Dante na sua *Divina comédia*, esse esquema cosmológico se tornou uma visão que influenciaria profundamente o pensamento ocidental.

Astronomia medieval e renascentista

A posição das estrelas no céu predizia a mudança das estações. Qual era, então, o significado dos cinco objetos brilhantes que vagavam através do fundo estrelado? Uma conclusão "óbvia" era que o movimento desses planetas ("planeta" significa errante) predizia questões humanas erráticas e, portanto, exigia séria atenção. As raízes da astronomia estão na astrologia.

No século II, Ptolomeu de Alexandria descreveu matematicamente os movimentos celestes tão bem que calendários e navegação baseados em seu modelo funcionavam lindamente. As predições do astrólogo – pelo menos referentes às posições dos planetas – eram igualmente acuradas. A astronomia de Ptolomeu, com uma Terra estacionária como centro cósmico, requeria que os planetas se movessem em "epiciclos", complicadas laçadas compostas de círculos enrolados em círculos dentro de círculos adicionais. O rei Afonso X de Castela, quando lhe foi explicado o sistema ptolomaico, teria comentado: "Se o Senhor Deus Onipotente tivesse me consultado antes de embarcar na Criação, eu teria recomendado algo mais simples." No entanto, a combinação da física de Aristóteles com a astronomia de Ptolomeu era aceita tanto como verdade prática quanto como doutrina religiosa, e foi imposta à força pela Santa Inquisição.

ENTÃO, NO SÉCULO XVI, uma nova percepção que colocava em questão tudo isso surgiu dentro da própria Igreja. O clérigo e astrônomo polonês Nicolau Copérnico sentiu que a natureza devia ser mais simples do que a cosmologia de Ptolomeu. Ele sugeriu que a Terra e cinco outros planetas orbitavam um Sol central, estacionário. Os movimentos para a frente e para trás dos planetas em relação ao fundo estrelado eram resultado da observação que fazíamos deles a partir de uma Terra também em órbita. Nosso planeta era simplesmente o terceiro, contando a partir do Sol. Era um quadro mais simples.

Simplicidade dificilmente era um argumento convincente. A Terra “obviamente” estava parada. Ninguém *sentia* nenhum movimento. Uma pedra caindo ficaria para trás numa Terra em movimento. Se a Terra se movesse, uma vez que se presumia que o ar ocupava todo o espaço, deveria provocar um vento fortíssimo! E, mais ainda, uma Terra em movimento conflitava com a sabedoria da Idade de Ouro. Tais argumentos eram difíceis de refutar. E, mais perturbador, considerava-se que o sistema copernicano contradizia a Bíblia, e duvidar da Bíblia ameaçava a salvação.

O trabalho de Copérnico, publicado pouco depois de sua morte, incluía um prefácio, provavelmente adicionado por um editor, que anunciava sua descrição como apenas uma conveniência matemática – ela não correspondia a movimentos *reais*. Qualquer contradição com os ensinamentos da Igreja era repudiada.

Uma análise brilhante feita algumas décadas mais tarde por Johannes Kepler mostrou que novos e acurados dados sobre o movimento dos planetas encaixavam-se perfeitamente se se admitisse que os planetas se moviam em órbitas *elípticas*, com o Sol em um dos focos. Ele também descobriu uma regra simples que dava o tempo exato que cada planeta levava para completar uma órbita, dependendo de sua distância do Sol. Kepler não podia explicar sua regra e não gostava de elipses, “círculos imperfeitos”, mas, erguendo-se acima do preconceito, aceitava o que via.

Kepler fez grande astronomia, mas não era a ciência que guiava sua visão de mundo. Inicialmente, considerou que os planetas eram empurrados ao longo das órbitas por anjos e, como ocupação secundária, traçava horóscopos, nos quais provavelmente acreditava. E também precisou ceder um tempo de sua atividade astronômica para defender a mãe de acusações de bruxaria.

As novas ideias de Galileu sobre o movimento

Em 1591, com apenas 27 anos de idade, Galileu tornou-se professor da Universidade de Pádua, mas logo se afastou para assumir um posto em Florença. O corpo docente de uma faculdade atual entenderia o motivo: mais tempo para pesquisa e menos dando aulas. Seus talentos incluíam música e arte, tanto quanto ciência. Brilhante, espirituoso e charmoso, Galileu também sabia ser arrogante, impertinente e mesquinho. Sua habilidade com as palavras era invejável. Ele gostava de mulheres, e elas gostavam dele.

Galileu era um copernicano convicto. Aquele modelo mais simples fazia sentido para ele. Mas, ao contrário de Copérnico, Galileu não alegava que essa era meramente uma nova técnica para cálculo, ele argumentava em prol de uma nova visão de mundo. Uma abordagem humilde não era seu estilo.

A Igreja tinha de impedir a inclinação de Galileu para um pensamento independente – o negócio da Igreja era salvar almas, não validade científica. Julgado culpado pela Santa Inquisição e levado a um breve passeio pelas câmaras de tortura, Galileu renegou sua heresia de uma Terra que se movia em torno do Sol. Durante seus últimos anos, viveu em prisão domiciliar – uma punição menor que a de outro copernicano, Giordano Bruno, que foi queimado na fogueira.

Apesar de ter renegado, Galileu sabia que a Terra se movia. Mais ainda, percebeu que a explicação de Aristóteles do movimento não podia sobreviver numa Terra que não estivesse parada. Atrito, e não desejo de repouso no centro cósmico, fazia com que um bloco escorregando parasse. A resistência do ar, e não um desejo menor pelo centro cósmico, fazia com que uma pena caísse mais devagar que uma pedra.

Contradizendo as alegações de Aristóteles, Galileu afirmou: “Na ausência de atrito ou de outra força atuante, um objeto continuará a se mover

horizontalmente numa rapidez constante.” E: “Na ausência da resistência do ar objetos pesados e objetos leves cairão com a mesma rapidez.”

As ideias de Galileu eram óbvias – para *ele*. Como poderia convencer os outros? Rejeitar os ensinamentos de Aristóteles sobre o movimento da matéria não era pouca coisa. A filosofia de Aristóteles era uma visão de mundo totalmente abrangente, consagrada pela Igreja. Rejeite uma parte e parecerá que você está rejeitando tudo.

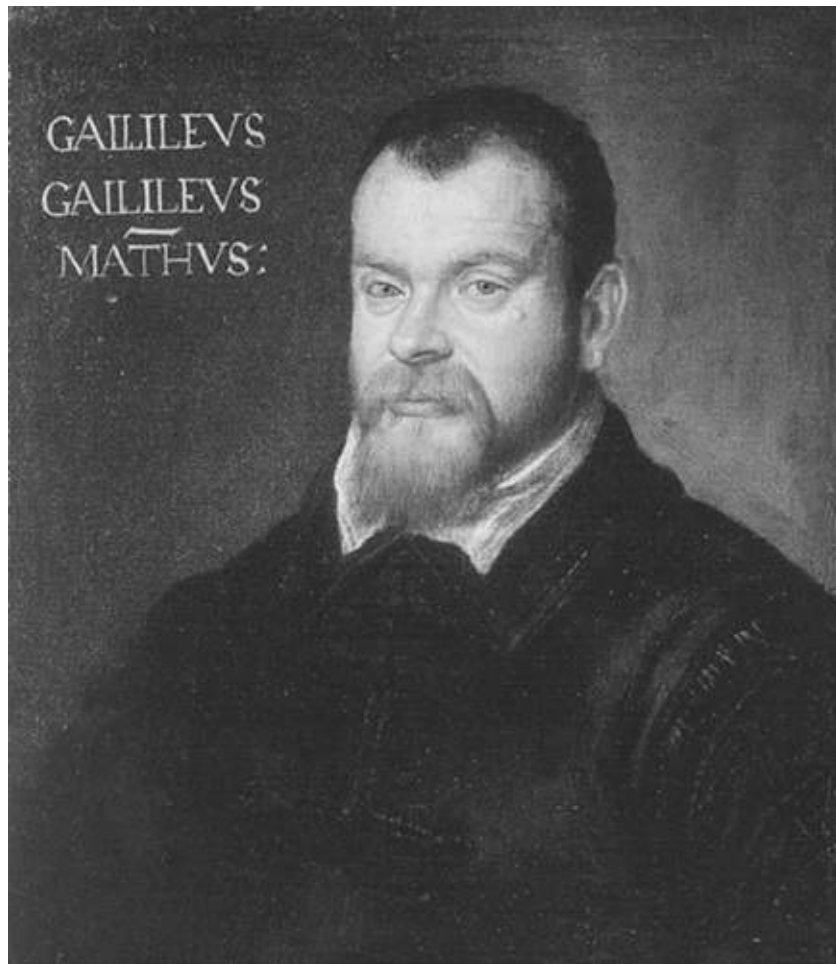



FIGURA 3.1 Galileu Galilei. © National Maritime Museum, Greenwich, Londres.

O método experimental

Para levar à concordância com suas ideias, Galileu precisava de exemplos que entrassem em conflito com a mecânica aristotélica – mas que estivessem em conformidade com as suas próprias concepções. Olhando ao redor, ele podia ver pouquíssimos desses casos. Sua solução: *criá-los!*

Galileu inventou situações especiais: “experimentos”. Um experimento testa uma predição teórica. Essa pode parecer hoje uma abordagem óbvia, mas naquele tempo foi uma ideia original e profunda.

Em seu experimento mais famoso, Galileu teria deixado cair uma bola de chumbo e uma bola de madeira da inclinada Torre de Pisa. O som simultâneo da madeira e do chumbo tocando o chão provava que a madeira leve caía tão depressa quanto o chumbo pesado. Tais demonstrações davam razão suficiente, argumentou ele, para abandonar a teoria de Aristóteles e aceitar a sua.

Alguns puseram defeito no método experimental de Galileu. Embora os fatos expostos não pudessem ser negados, as demonstrações de Galileu eram situações *inventadas*, portanto insignificantes, porque conflitavam com a natureza intuitivamente óbvia da matéria. Além disso, as ideias de Galileu *deviam* estar erradas, afinal, entravam em conflito com a filosofia de Aristóteles.

Galileu tinha uma resposta de longo alcance: a ciência deve lidar apenas com questões que possam ser demonstradas. Intuição e autoridade não têm lugar na ciência. *O* único *critério de juízo em ciência é a demonstração experimental*.

Em poucas décadas, a abordagem de Galileu era fortemente aceita. A ciência passou a progredir com um vigor nunca visto antes.

Ciência confiável

Estabeleçamos um acordo quanto a algumas regras de evidência para aceitar uma teoria como ciência confiável. Elas serão de grande proveito na hora de considerar a contraintuitiva teoria quântica.

Mas antes uma observação sobre a palavra "teoria". Falamos em *teoria* quântica, mas em *leis* de Newton. "Teoria" é a palavra moderna. Não conseguimos pensar numa única "lei" em física no século XX ou XXI. Embora "teoria" seja, às vezes, um termo usado para uma ideia especulativa, não implica *necessariamente* incerteza. A *teoria* quântica é, até onde se saiba, completamente correta. As *leis* de Newton são uma aproximação.

Para levar ao consenso, uma teoria deve, antes de tudo, fazer previsões que sejam testáveis, com resultados que possam ser expostos objetivamente. Ela deve se manter em equilíbrio em situações instáveis, desafiando possíveis refutadores.

"Se você for bonzinho, irá para o Céu." Essa previsão pode muito bem estar correta, mas não é objetivamente testável. Religiões, posições políticas ou filosofias em geral não são teorias científicas. A teoria testável aristotélica da queda – que prediz que uma pedra de um quilo cairá com o dobro da rapidez que uma pedra de meio quilo – é uma teoria científica, embora errada.

Uma teoria que faz previsões testáveis é uma *candidata* a ciência confiável. Suas previsões devem ser testadas por experimentos que a desafiem, tentando refutá-la. E os experimentos devem ser convincentes mesmo para os céticos. Por exemplo, teorias que sugerem a existência de percepção extrassensorial (PES) fazem previsões, mas, até o momento, os testes não têm sido convincentes para os céticos.

Para qualificar-se como ciência confiável, uma teoria deve ter muitas das suas previsões confirmadas sem uma única contestação. Uma única previsão

incorreta força a modificação ou o abandono da teoria. O método científico é rigoroso – um erro e você está fora! Na verdade, nenhuma teoria científica é *totalmente* confiável – sempre é possível que ela venha a falhar em algum teste futuro. Uma teoria científica é, na melhor das hipóteses, *tentativamente* confiável.

O método científico, estabelecendo padrões elevados de verificação experimental, é duro com as teorias. Mas também pode ser duro conosco. Se uma teoria atende a esses padrões elevados, somos obrigados a aceitá-la como ciência confiável – não importa quão violentamente entre em conflito com nossa intuição. A teoria quântica será nosso relevante caso em foco.

A visão de mundo newtoniana

Isaac Newton nasceu em 1642, ano em que Galileu morreu. Com a larga aceitação do método experimental, havia um sentimento de progresso científico, embora a física errônea de Aristóteles ainda fosse ensinada. A Real Sociedade de Londres, hoje uma importante organização científica, foi fundada em 1660. Seu lema, *Nullis in verba*, pode ser traduzido livremente como “Não aceite a palavra de ninguém”. Galileu teria ficado deliciado.

Newton, um sujeito habilidoso, devia supostamente assumir a fazenda da família. Porém, mais interessado em livros que em arados, conseguiu ir para a Universidade de Cambridge, fazendo serviços subalternos para ajudar a pagar sua permanência. Não brilhou como estudante, mas a ciência o fascinava – a “filosofia natural”, como era então chamada. Quando a Grande Peste forçou a universidade a fechar, Newton retornou à fazenda por um ano e meio.

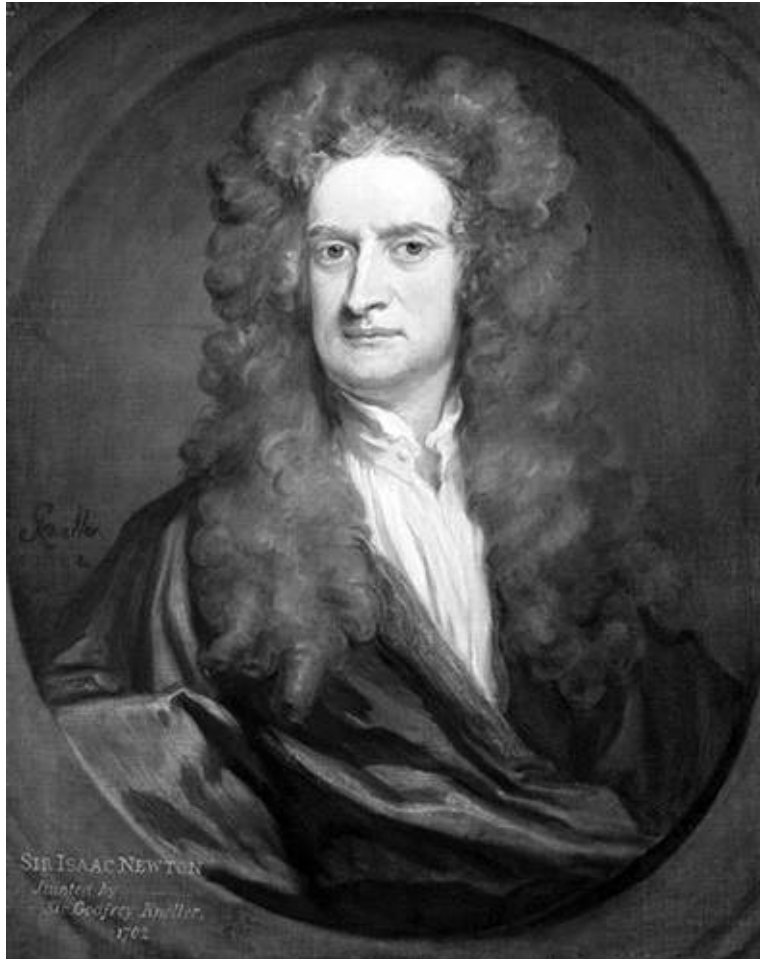



FIGURA 3.2 Isaac Newton (1642-1727), 1702. Foto de sir Godfrey Kneller, cortesia Getty Images.

O jovem Newton compreendeu o ensinamento de Galileu de que, numa superfície horizontal perfeitamente lisa, um bloco, uma vez em movimento, deslizaria para sempre. É necessária apenas uma força para superar o atrito. Com uma força maior, o bloco aumentaria a velocidade; aceleraria.

Galileu, porém, havia aceitado o conceito aristotélico de que a queda era “natural” e não necessitava de força. Também tinha considerado que os planetas se moviam “naturalmente” em círculos sem nenhuma força. Galileu simplesmente ignorou as elipses descobertas por seu contemporâneo, Kepler. Para conceber suas leis universais de movimento e gravidade, Newton teve de ir além da aceitação de Galileu da “naturalidade” aristotélica.

Newton conta que teve uma inspiração ao observar uma maçã cair. Provavelmente perguntou a si mesmo: como era necessária uma força para a aceleração *horizontal*, por que não uma força para a aceleração *vertical*? E se há uma força para baixo sobre a maçã, por que não sobre a Lua? E, se assim for, por que a Lua não cai sobre a Terra como a maçã?

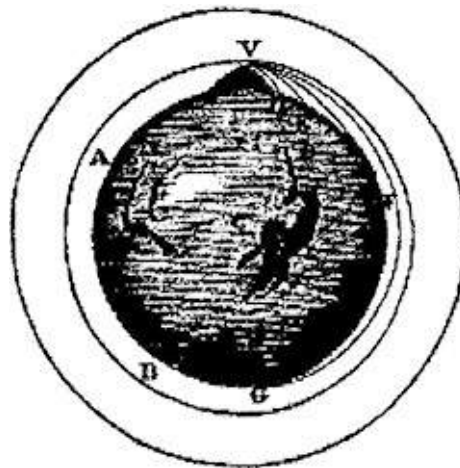



FIGURA 3.3 Desenho de Newton de um canhão sobre uma montanha.

No famoso desenho de Newton do canhão sobre a montanha, uma bala largada do canhão vai direto para baixo, enquanto as disparadas com velocidades cada vez maiores aterrissam cada vez mais longe. Se uma bala for disparada com velocidade suficiente, não atingirá o planeta. No entanto, ela continua a "cair". Continua a acelerar em direção ao centro da Terra enquanto também se move "horizontalmente". Ela, portanto, orbita a Terra. Quando a bala dá a volta inteira, é melhor o canhoneiro se abaixar!

A Lua só não cai na Terra porque, como essa bala de canhão rápida, tem uma velocidade perpendicular ao raio da Terra. Newton percebeu o que ninguém tinha notado antes: a Lua está caindo.

A lei universal do movimento e, *simultaneamente*, a força da gravidade

Galileu pensava que o movimento uniforme sem força se aplicava apenas àquele que fosse paralelo à superfície da Terra, num *círculo* em torno do centro da Terra. Newton corrigiu isso ao dizer que é necessária uma força para fazer um corpo desviar de uma velocidade constante em *linha reta*.

Quanta força é necessária? Quanto maior a massa do corpo, maior deve ser a força necessária para acelerá-lo. Newton especulou que a força necessária era exatamente a massa do corpo multiplicada pela aceleração produzida, ou $F = Ma$. É a lei universal do movimento de Newton.

Na época de Newton, porém, parecia haver um contraexemplo. Cair era uma aceleração para baixo, mas aparentemente *sem* força aplicada. O jovem Newton teve de conceber duas ideias profundas *simultaneamente*: sua lei do movimento *e* a força da gravidade.

QUANDO A PESTE CEDEU, Newton retornou a Cambridge. Isaac Barrow, então professor lucasiano de matemática, logo ficou tão impressionado com seu aluno que renunciou para permitir que Newton assumisse essa cadeira. O rapaz quieto tornou-se um solteirão recluso. (O celibato era então uma exigência para o corpo docente de Cambridge.) Newton era reservado e temperamental, e frequentemente se irritava com críticas bem-intencionadas. Era melhor passar a noite conversando com Galileu.

As ideias de Newton precisavam ser testadas. No entanto, a força da gravidade entre objetos que ela podia mover sobre a Terra era pequena demais para que pudesse ser medida. Então ele olhou para o céu. Usando sua equação do movimento e sua lei da gravidade, deduziu uma fórmula simples. Sem dúvida um arrepio deve ter percorrido sua espinha quando a viu. Sua fórmula era

precisamente a regra inexplicada que Kepler anotara décadas antes para o tempo exato que cada planeta levava para orbitar o Sol.

Newton pôde também calcular que o período orbital da Lua, de 27 dias, era justamente o que se esperaria se um objeto em queda adquirisse uma velocidade de dez metros por segundo a cada segundo de queda – exatamente a aceleração experimentalmente demonstrada por Galileu. As equações do movimento e da gravidade de Newton governavam maçãs bem como a Lua – tanto na Terra quanto no céu. As equações de Newton eram universais.

Principia

Newton percebeu a importância de suas descobertas, mas a controvérsia sobre o primeiro artigo que escreveu o havia aborrecido seriamente. Agora, a ideia de publicar o deixava aterrorizado.

Cerca de vinte anos depois de seus *insights* ainda na fazenda, Newton recebeu a visita do jovem astrônomo Edmund Halley. Sabendo que outros estavam especulando sobre uma lei da gravidade que explicasse as órbitas elípticas de Kepler para os planetas, Halley perguntou a Newton que órbitas sua lei da gravidade prediria. Newton respondeu imediatamente: “Elipses.” Impressionado com a rápida resposta, Halley pediu para ver os cálculos. Newton não conseguiu achar suas anotações. Um historiador comenta: “Enquanto outros buscavam uma lei da gravidade, Newton já a tinha perdido.”

Depois que Halley o alertou de que outros poderiam passar-lhe à frente, Newton passou dezoito furiosos meses produzindo *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Aquilo que agora é citado meramente como *Principia* foi publicado em 1687 com Halley pagando a conta. Os receios de Newton quanto às críticas se concretizaram; alguns chegaram a alegar que ele havia roubado seus trabalhos.

Embora tenha sido amplamente reconhecido como a revelação profunda das leis da natureza, o livro, sendo matematicamente rigoroso e em latim, foi pouco lido. Porém, logo apareceram versões popularizadas. *Newtonianism for Ladies* foi um best-seller. Voltaire, auxiliado pela sua companheira de maior talento científico, madame du Châtelet, em seu *Éléments de la philosophie de Newton* alegou “reduzir esse gigante para a medida dos palermas que são meus colegas”.

A racionalidade revelada da natureza era revolucionária. Implicava, ao menos em princípio, que o mundo devia ser tão compreensível como o mecanismo dos relógios. Isso seria depois espetacularmente demonstrado pela

exata predição de Halley do retorno de um cometa. Até então, costumava-se pensar que um cometa pressagiava a morte de um rei.

O *Principia* deflagrou um movimento intelectual conhecido como Iluminismo. A sociedade não olharia mais para a Idade de Ouro da Grécia em busca de sabedoria. Alexander Pope captou esse estado de espírito: “A natureza e suas leis jaziam ocultas na noite:/ Deus disse: Faça-se Newton! E a luz se fez.”

Quando precisou de uma matemática melhor, Newton inventou o cálculo. Seus estudos da luz transformaram o campo da óptica. Ele assumiu a cadeira no Parlamento então reservada para Cambridge. Tornou-se diretor da Casa da Moeda, e levou o cargo a sério. Em seus últimos anos, sir Isaac – o primeiro cientista a ser consagrado cavaleiro – talvez tenha sido a pessoa mais respeitada no mundo ocidental. Paradoxalmente, Newton também era místico, dedicando-se a alquimia sobrenatural e interpretação de profecias bíblicas.

O legado de Newton

O impacto mais imediato da visão de mundo newtoniana foi quebrar a síntese do físico com o espiritual do final da Idade Média. Enquanto Copérnico tinha, talvez não intencionalmente, dado início à destruição dessa relação patrocinada pela Igreja negando a Terra como centro cósmico, Newton completou o serviço mostrando que a mesma lei *física* valia tanto para o domínio terrestre quanto para o celestial. Sob essa inspiração, geólogos, presumindo que as mesmas leis também se aplicavam ao longo do tempo, mostraram que a Terra era bem mais velha que os 6 mil anos bíblicos. Isso levou diretamente à teoria da evolução de Darwin, a ideia mais socialmente perturbadora da ciência moderna.

Embora aspectos do legado de Newton devam permanecer para sempre, sua visão de mundo mecanicista – e o que hoje chamamos de "física clássica" – é questionada pela física moderna. Mesmo assim, a herança newtoniana ainda molda a visão do mundo físico de nosso senso comum, bem como nosso modo de pensar em toda esfera intelectual.

Vamos focalizar agora cinco posturas newtonianas de "senso comum", porque logo mostraremos como a mecânica quântica desafia cada uma delas.

Determinismo

Bolas de bilhar idealizadas são o adorado modelo do físico para o determinismo. Se você sabe a posição e a velocidade de um par prestes a se chocar, com a física de Newton pode predizer sua posição e velocidade em qualquer momento futuro que queira. Computadores podem calcular as posições futuras de um grande número de bolas colidindo.

O mesmo se poderia dizer, em princípio, de átomos que se agitam dentro de uma caixa de gás. Levando essa ideia ao extremo, para um "olho que tudo vê"

que conhecesse a posição e a velocidade de cada átomo no Universo num dado momento, todo o futuro do Universo seria visível. O futuro de tal Universo newtoniano é, em princípio, *determinado* – quer alguém *conheça* ou não esse futuro. O Universo determinista newtoniano é a Grande Máquina. As engrenagens de seu mecanismo, como as de um relógio, movem-se num curso predeterminado.

Deus torna-se então o Mestre Relojoeiro, o Grande Engenheiro. Alguns foram mais longe. Depois de fazer uma máquina completamente determinista, Deus ficou sem função – passou a ser um engenheiro *aposentado*. E passar da aposentadoria para a inexistência era um passo pequeno.

O determinismo torna-se pessoal: serão as nossas escolhas aparentemente livres na realidade predeterminadas? Segundo Isaac Bashevis Singer, “é preciso acreditar no livre-arbítrio. Você não tem escolha”. Temos um paradoxo: nossa percepção do livre-arbítrio entra em conflito com o determinismo da física newtoniana.

E quanto ao livre-arbítrio *antes* de Newton? Sem problemas. Na física de Aristóteles, mesmo uma pedra seguia sua inclinação individual ao rolar morro abaixo do seu modo particular. É o determinismo da física newtoniana que apresenta o paradoxo.

Trata-se, porém, de um paradoxo benigno. Embora afetemos o mundo físico por meio de nosso livre-arbítrio consciente, os efeitos externamente observáveis do livre-arbítrio sobre o mundo físico manifestam-se indiretamente, por meio dos nossos músculos, que movem as coisas fisicamente. A consciência pode ser vista como confinada no nosso corpo.

A física clássica permite assim o isolamento tácito da consciência e do livre-arbítrio a ela associado em relação aos domínios da preocupação do físico. Existe a mente e existe a matéria. A física lida com a matéria. Com esse universo dividido, os físicos pré-quânticos podiam evitar logicamente o paradoxo. Podiam evitá-lo porque ele surgiu apenas mediante a *teoria* determinista, não por meio de qualquer demonstração experimental. Logo, limitando o escopo da teoria de

modo a excluir o observador, os físicos puderam relegar o livre-arbítrio e o restante da consciência à psicologia, à filosofia e à teologia. E essa era sua inclinação.

O determinismo foi desafiado na criação da mecânica quântica, quando Max Planck fez elétrons se comportarem aleatoriamente. Um desafio posterior, mais profundo, foi a intrusão do observador no *experimento* quântico. A questão do livre-arbítrio não poderia mais ser simplesmente excluída da física limitando o escopo da teoria. Ela surge na *demonstração experimental*. Com a mecânica quântica, o paradoxo do livre-arbítrio consciente deixa de ser benigno.

Realidade física

Antes de Newton, as explicações eram místicas – e em grande parte inúteis. Se os planetas eram empurrados por anjos e as pedras caíam por causa do seu desejo inato pelo centro cósmico, se sementes brotavam buscando imitar plantas maduras, quem poderia negar a influência de outras forças ocultas? Ou que as fases da Lua, ou encantações, podiam ser relevantes? A gripe, cujo nome em inglês é “*flu*”, abreviação de “*influenza*”, tem esse nome porque era originalmente explicada em termos de *influência* sobrenatural.

Em contraste, na visão de mundo newtoniana, a natureza era uma máquina cujo funcionamento, embora não completamente entendido, não precisava ser mais misterioso que o do relógio cujas engrenagens não são vistas. A aceitação de tal mundo fisicamente real tornou-se nosso saber convencional. Embora possamos dizer que o carro “não quer pegar”, esperamos que o mecânico ache uma explicação física.

Levantamos a questão da “realidade” porque a mecânica quântica desafia a visão clássica que temos dela. Mas evitemos mal-entendidos semânticos. *Não* estamos falando de realidade *subjetiva*, uma realidade que pode diferir de uma pessoa a outra. Por exemplo, podemos dizer: “Você cria sua própria realidade”, referindo-nos a uma realidade *psicológica*. Aqui, porém, estamos falando de

realidade *objetiva*, uma realidade em relação à qual podemos todos concordar, como a da posição de uma pedra.

Durante milênios, os filósofos têm assumido posturas amplamente variadas sobre a natureza da realidade. Uma postura filosófica convencional chamada “realismo” afirma que a existência do mundo físico é independente de sua observação. Uma versão mais drástica nega a existência de qualquer coisa *além* de objetos físicos. Nessa concepção “materialista”, a consciência, por exemplo, deveria ser totalmente compreensível, pelo menos em princípio, em termos das propriedades eletroquímicas do cérebro. A aceitação tácita de tal visão materialista, e mesmo sua defesa explícita, não é incomum nos dias de hoje.

Contrastando com a atitude realista newtoniana ou a materialista está a posição filosófica do “idealismo”, a qual sustenta que o mundo que percebemos não é o mundo *real*. No entanto, o mundo real pode ser captado com a mente.

Uma posição idealista extrema é o solipsismo. Eis sua essência: *tudo* o que vivencio são as minhas próprias sensações. Tudo o que posso saber do meu lápis, por exemplo, é a sensação de sua luz refletida na minha retina e a pressão contra meus dedos. Não posso demonstrar que exista algo de “real” em relação a esse lápis, nem em relação a nada, além das sensações que vivencio. (Perceba que este parágrafo está na primeira pessoa do singular. O resto de vocês são, solipsisticamente falando, só sensações no meu mundo mental.)

“Se uma árvore cai na floresta e ninguém ouve, há algum ruído?” O realista responde: “Sim. Mesmo que as variações de pressão do ar que experimentaríamos como som não fossem ouvidas por ninguém, elas existiram como fenômeno fisicamente real.” O solipsista diz: “Não. Nem mesmo havia uma árvore, a não ser que eu a vivenciasse. Mesmo então, só as minhas sensações conscientes *realmente* existiam.” Quanto a isso, citamos o filósofo Woody Allen: “E se tudo é uma ilusão e nada existe? Nesse caso, decididamente paguei demais pelo tapete.”

Veremos que a intrusão do observador consciente no experimento quântico abala tão drasticamente nossa visão de mundo newtoniana que as questões

filosóficas do realismo, do materialismo, do idealismo – mesmo do tolo solipsismo! – vêm à tona para discussão.

Separabilidade

A ciência renascentista, com sua base aristotélica, estava repleta de conectividades misteriosas. Pedras tinham avidez pelo centro cósmico. Sementes buscavam imitar carvalhos próximos. Alquimistas acreditavam que sua pureza pessoal influenciava as reações químicas em seus tubos. Em contraste, na visão de mundo newtoniana um naco de matéria, um planeta ou uma pessoa interage com o resto do mundo *apenas* por meio de forças fisicamente reais aplicadas por outros objetos. De outra maneira, é *separável* do resto do Universo. Exceto pelas forças físicas aplicadas, um objeto não tem "conectividade" com o resto do Universo.

Forças físicas podem ser sutis. Por exemplo, quando um sujeito, vendo uma amiga, ajusta seu movimento para encontrar-se com ela, a força de influência é transmitida pela luz refletida por ela e é exercida em moléculas de rodopsina na retina dele. Por outro lado, teríamos uma *violação* da separabilidade se um sacerdote de vodu pudesse enfiar uma agulha numa boneca e por meio desse ato, sem uma força física de conexão, causar dor.

Violando nossa intuição clássica, a mecânica quântica inclui influências instantâneas que *violam* a separabilidade. Einstein as ridicularizava, chamando-as de "ações fantasmagóricas". No entanto, experimentos reais demonstram agora que elas de fato existem.

Redução

Muitas vezes implícita na visão de mundo como algo abrangente está a hipótese reducionista de que um sistema complexo pode – ao menos em princípio – ser explicado em termos de, ou "reduzido" a, suas partes mais simples. O

funcionamento de um motor de automóvel, por exemplo, pode ser explicado em termos da pressão da gasolina em combustão empurrando os pistões.

Explicar um fenômeno psicológico em termos de sua base biológica seria a redução de um aspecto da psicologia à biologia. ("Há em você mais molho que morte", diz Scrooge ao fantasma de Marley[a] ao reduzir seu sonho a um problema digestivo.)

Um químico poderia explicar uma reação química em termos de propriedades físicas dos átomos envolvidos, algo atualmente viável em casos simples. Isso seria reduzir um fenômeno químico à física.

Podemos pensar numa pirâmide reducionista, uma hierarquia que fosse da psicologia à física, com a física firmemente baseada em fatos empíricos. Explicações científicas geralmente são reducionistas, movendo-se rumo aos princípios mais básicos. Embora o movimento seja *nessa direção*, ele geralmente só ocorre em passos pequenos. Sempre necessitaremos de princípios gerais específicos em cada nível.

O exemplo clássico de uma violação do reducionismo é a "força vital" proposta certa vez para explicar processos da vida. A vida, de acordo com essa concepção, surgiu no nível biológico, sem uma origem na química ou na física. Esse pensar vitalista não leva a lugar nenhum e, é claro, não tem lugar na biologia de hoje.

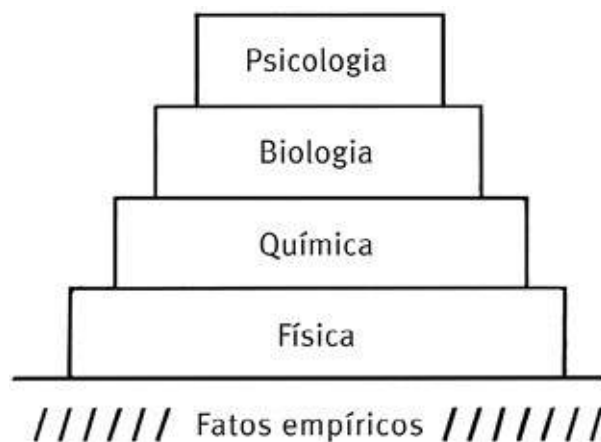



FIGURA 3.4 Hierarquia da explicação científica.

Em estudos da consciência, atualmente a redução deflagra controvérsias. Alguns argumentam que, uma vez que os correlatos neurais eletroquímicos da consciência sejam compreendidos, nada restará para ser explicado. Outros insistem que a "luz interior" da nossa experiência consciente escapará das garras reducionistas, que a consciência é primária e que novos "princípios psicológicos" serão necessários. A mecânica quântica é reivindicada como evidência, apoiando essa concepção não reducionista.

Uma explicação suficiente

Newton foi desafiado a *explicar* sua força da gravidade. Uma força transmitida através do espaço vazio, através do *nada*, era uma pílula amarga demais para engolir.

Newton tinha uma resposta sucinta: *"Hypotheses non fingo"* ("Eu não faço hipóteses"). Assim, ele alegava que uma teoria não precisava fazer nada mais que prover previsões consistentemente corretas. A atitude de *hypotheses non fingo* volta a surgir com a mecânica quântica. Porém, a negação de uma realidade física direta pela teoria quântica é uma pílula ainda mais amarga de engolir do que uma força transmitida através do nada.

Além da física por analogia

Nas décadas que se seguiram a Newton, os engenheiros aprenderam a construir as máquinas que lançaram a Revolução Industrial. Os químicos foram além da mística da alquimia, que durante séculos não havia conseguido praticamente nada. A agricultura tornou-se científica, conforme o entendimento substituiu o folclore. Embora as primeiras pessoas que trabalharam com tecnologia quase não usassem física, os avanços rápidos que fizeram exigiram a perspectiva newtoniana segundo a qual leis discerníveis governam o mundo físico.

A física de Newton tornou-se um paradigma para todos os empreendimentos intelectuais. Analogias com a física eram grandes e arrojadas. Augusto Comte inventou o termo “sociologia” e referia-se a ela como “física social”, na qual as pessoas eram “átomos sociais” motivados por forças. Um estudo da sociedade jamais fora antes encarado como científico.

Forçando a analogia com a física newtoniana, Adam Smith argumentava em favor do capitalismo do *laissez-faire*, alegando que, se as pessoas tivessem permissão de perseguir seus próprios interesses, uma “mão invisível”, uma lei fundamental de economia política, regularia a sociedade para o bem geral.

Analogias são flexíveis. Karl Marx sentiu que ele, e não Adam Smith, havia descoberto a lei correta. Marx alegava ter “desnudado a lei do movimento econômico”. Com essa lei ele predizia o futuro comunista. Por analogia com o sistema mecânico, somente precisava saber a condição inicial, que, pensava ele, era o capitalismo do seu tempo. Assim, a principal obra de Marx, *O capital*, é um estudo do capitalismo.

Analogias também surgiram na psicologia. Sigmund Freud escreveu: “É intenção deste projeto aparelhar-nos com uma psicologia que seja uma ciência natural. Seu objetivo é representar processos psíquicos como estados quantitativamente determinados de partículas materiais específicas …”

Suficientemente newtoniano? Como exemplo posterior, considere a declaração de B.F. Skinner: “A hipótese de que o homem não é livre é essencial para a aplicação do método científico ao estudo do comportamento humano.” Ele nega explicitamente o livre-arbítrio, adotando polemicamente o materialismo e o determinismo newtoniano.

O apelo de tais abordagens nas ciências sociais tem esfriado. Gente que trabalha em áreas tão complexas está mais ciente hoje das limitações de um método que funciona bem para situações físicas mais simples. Mas a perspectiva newtoniana *mais ampla*, a busca de princípios gerais que sejam então sujeitos a testes empíricos, é o modo aceito.

A perspectiva newtoniana é nossa herança intelectual. Dificilmente podemos escapar disso. É a base para o senso comum do dia a dia. Até mesmo para o senso comum *científico*. Ser explícitos quanto a isso pode nos ajudar a apreciar o desafio que a mecânica quântica apresenta a essa visão de mundo clássica.

---

[a] Personagens de Charles Dickens. (N.T.)

4. Todo o resto da física clássica

> Não há nada de novo a ser descoberto na física agora.
> Tudo o que resta são medições mais e mais precisas.
>
> LORDE KELVIN (em 1894)

EM 1900, seis anos depois de ter feito essa declaração, Kelvin detalhou: "A física está essencialmente completa: há apenas duas nuvens escuras no horizonte." Ele escolheu as nuvens certas: uma ocultava a relatividade; a outra, a mecânica quântica. Mas, antes de olharmos atrás dessas nuvens, vamos contar um pouco mais sobre a física do século XIX, que hoje chamamos de "clássica". Descreveremos o fenômeno da "interferência", que demonstra que algo é uma onda espalhada. Desenvolveremos o conceito de campo elétrico, pois a luz é um campo elétrico que varia com rapidez e foi com a luz que o enigma quântico surgiu pela primeira vez. Falaremos também de energia e sua "conservação", sua totalidade invariável. E, por fim, contaremos brevemente a teoria da relatividade de Einstein. Suas previsões, bem confirmadas mas difíceis de acreditar, são um bom exercício psicológico para as implicações "impossíveis de acreditar" da teoria quântica. Este capítulo é uma boa base sobre o que você realmente *precisa* saber para compreender o enigma quântico. Mas há nele um pouco mais.

A história da luz

Newton concluiu que a luz era um fluxo de minúsculas partículas. Ele tinha bons argumentos: tal qual objetos obedecendo a sua equação universal do movimento, a luz viaja em linha reta a menos que encontre algo que possa exercer alguma força sobre ela. Nas palavras de Newton: “Não são os Raios de Luz Corpos muito pequenos emitidos de Substâncias brilhantes? Pois tais Corpos passarão através de Meios uniformes em Linhas retas sem se curvar para a Sombra, que é a Natureza dos Raios de Luz.”

Na verdade, Newton estava em conflito. Ele investigou a propriedade da luz que agora conhecemos como “interferência”, um fenômeno especialmente característico de ondas espalhadas. No entanto, acabou optando veementemente em favor de partículas. As ondas pareciam requerer um meio no qual se propagar, e esse meio impediria o movimento dos planetas, algo que sua equação universal do movimento parecia contrariar. Nas suas palavras:

> E contra preencher os Céus com Meios fluidos, a menos que sejam excepcionalmente rarefeitos, uma grande Objeção surge dos Movimentos regulares e muito duradouros dos Planetas e Cometas em todo tipo de Percursos através dos Céus … [O]s Movimentos dos Planetas e Cometas sendo mais bem explicados sem eles … [E]ntão não há evidência para sua Existência, e portanto devem ser rejeitados. E, se forem rejeitados, as Hipóteses de que a Luz consiste em *Pressão* ou Movimento, propagado através de tal Meio, são rejeitadas com eles.

Outros cientistas propuseram teorias ondulatórias da luz, mas a gigantesca autoridade de Newton significava que sua “teoria corpuscular”, de que a luz é uma saraivada de pequenos corpos, dominaria por mais de cem anos. Os newtonianos na realidade estavam mais seguros dos corpúsculos de Newton que o próprio Newton – até cerca de 1800, quando Thomas Young mostrou outra coisa.

Young foi um garoto precoce que, segundo se conta, lia fluentemente aos dois anos de idade. Estudou medicina, ganhava a vida como médico e era um

excepcional tradutor de hieróglifos. Mas seu principal interesse era a física. No começo do século XIX, Young forneceu a demonstração convincente de que a luz era uma onda.

Numa placa de vidro tornada opaca com fuligem, Young riscou duas linhas paralelas muito próximas uma da outra. A luz irradiando através dessas duas fendas sobre uma parede produziu faixas claras e escuras que chamamos de “padrão de interferência”. Veremos que esse padrão demonstra que a luz é uma onda espalhada.

Podemos visualizar uma “onda” como uma sequência de picos, ou cristas, e vales em movimento. Tais cristas e vales podem ser vistos, por exemplo, através do lado plano de um aquário como as ondulações na superfície da água. Outra forma de descrever ondas é a visão do alto, em que desenhamos linhas para indicar as cristas. Ondas no oceano vistas de um avião têm essa aparência. Vamos mostrar as ondas de ambas as maneiras, como na figura 4.1.

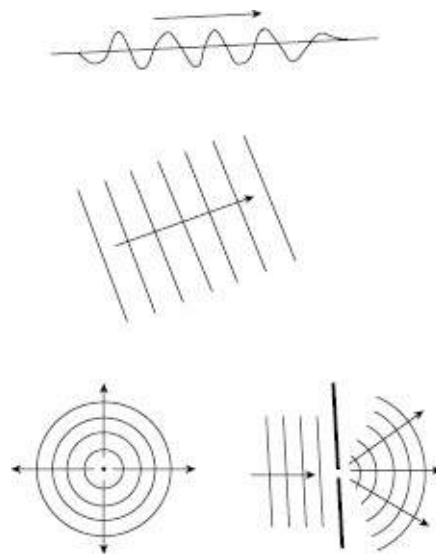



FIGURA 4.1 Imagens de ondas.

ONDAS PROVENIENTES de uma fonte pequena, como uma pedra jogada na água, por exemplo, espalham-se em todas as direções. Do mesmo modo, a luz que vem de um objeto luminoso pequeno se propaga em todas as direções. Pelo mesmo motivo, a luz proveniente de uma fonte pequena, digamos, passando por uma

fenda estreita, se espalhará em todas as direções e, incidindo sobre uma tela, irá iluminá-la de forma bastante uniforme. (O último diagrama mostra a fenda lateralmente.)

Seria de esperar que a luz passando através de *duas* fendas muito próximas iluminasse a tela com o dobro da claridade. Essa de fato seria a expectativa caso a luz fosse feita de um fluxo de pequenas partículas. Mas, quando Thomas Young projetou a luz através das duas fendas, viu faixas mais claras e mais escuras. E, importantíssimo, *a distância entre as faixas claras e escuras dependia do espaçamento das fendas*. Um fluxo de partículas independentes, passando por cada uma das fendas, não podia explicar esse comportamento.

A interferência é central para a teoria quântica e o enigma quântico, e nos próximos parágrafos iremos explicá-la em maiores detalhes. A interferência é aceita em física como a demonstração conclusiva do comportamento de uma onda espalhada. Se você está disposto a aceitar isso e simplesmente pular os próximos parágrafos – ou até saltar até a próxima seção, “A força eletromagnética” –, ainda assim poderá apreciar o enigma quântico.

EIS COMO A INTERFERÊNCIA ocorre: no ponto central da tela (ponto A na figura 4.2), as ondas de luz provenientes da fenda superior percorrem exatamente a mesma distância que as ondas de luz vindas da fenda inferior. Portanto, as cristas de uma fenda chegam junto com as cristas da outra. E os vales das duas fendas chegam ao mesmo tempo em A. Ondas idênticas provenientes das duas fendas chegando em A somam-se para produzir mais claridade do que existiria se houvesse apenas uma fenda aberta.

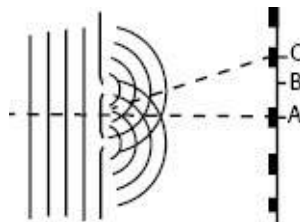



FIGURA 4.2 Interferência no experimento da dupla fenda.

Mas, para chegar a um ponto acima da posição central da tela (digamos, o ponto B na figura 4.2), as ondas da fenda inferior precisam percorrer uma distância um pouco maior que as da fenda superior. Portanto, no ponto B, as cristas da fenda inferior chegam *depois* das cristas da fenda superior. Em particular, no ponto B as cristas da fenda inferior chegam ao mesmo tempo que os *vales* da fenda superior. Essas cristas e vales chegando juntos anulam-se mutuamente. No ponto B as ondas das duas fendas se *subtraem*, produzindo uma região escura. A luz combinada com outra luz pode produzir escuridão.

Num ponto ainda mais distante tela acima (ponto C na figura 4.2), haverá outra faixa clara, porque nesse local, mais uma vez, as cristas de uma fenda chegam junto com as cristas da outra. Continuando a subir pela tela, faixas claras e escuras irão alternar-se, na medida em que as ondas das duas fendas alternadamente se reforçam e se anulam, de modo a formar o padrão de interferência. "Interferência" é na verdade um nome inadequado. As ondas das duas fendas não *interferem* umas com as outras, simplesmente se somam e se subtraem, como depósitos e retiradas de uma conta bancária.

Estamos assumindo que as ondas vindas das fendas tenham todas a mesma frequência, a mesma distância entre cristas, o mesmo comprimento de onda. Ou seja, assumimos que a luz é toda de uma única cor. Não fosse assim, cores diferentes teriam faixas claras em locais diferentes, resultando num padrão de interferência borrado.

Se você pensar na geometria, poderá ver que, quanto maior o espaçamento entre as fendas, menor será o espaçamento entre as faixas claras do padrão de interferência. Aqui os detalhes não são essenciais. O importante a lembrar é que *o espaçamento do padrão depende do espaçamento das fendas*. Young argumentou que, se a quantidade de luz em cada ponto da tela dependesse do espaçamento entre as fendas, cada ponto da tela receberia luz de *ambas* as fendas.

Se a luz fosse um fluxo de partículas, é de se supor que não haveria padrão de interferência. Pequenas balas independentes entre si, cada uma passando por

uma fenda *ou* por outra, não poderiam anular-se mutuamente para produzir um padrão que depende da separação entre as fendas.

Será que o argumento de Young é infalível? Provavelmente não. Quando Young o apresentou, foi fervorosamente discutido. Os colegas ingleses de Young eram fortes adeptos da escola de pensamento newtoniana, que favorecia as partículas. Como as ideias ondulatórias eram favorecidas pelos cientistas *franceses*, eram rejeitadas pelos ingleses em parte por essa *exclusiva* razão. Mas não demorou muito para experimentos adicionais superarem as objeções e a luz ser aceita como onda.

Descrevemos a interferência em termos de ondas de luz. Mas nossa discussão se aplica a ondas de todos os tipos. O ponto central é: a interferência demonstra que uma entidade é uma onda espalhada. A interferência *não pode* ser explicada por um fluxo de objetos compactos independentes.

A força eletromagnética

Um pedaço de seda esfregado sobre um vidro é atraído para o vidro, mas repelido por outro pedaço de seda esfregado sobre esse vidro. Tal "carga elétrica", constatada quando diferentes materiais são esfregados entre si, já era conhecida havia muito tempo. O passo crucial para compreendê-la foi uma ideia brilhante de Benjamin Franklin. Ele notou que, quando dois corpos quaisquer eletricamente carregados *que se atraem* entram em contato, a atração diminui. Compreendeu então que os corpos *que se atraem* mutuamente *cancelam* a carga um do outro.

O cancelamento é uma propriedade dos números positivos e negativos. Franklin atribuiu, assim, sinais algébricos, positivo (+) e negativo (–), para objetos carregados. Corpos com cargas de sinais opostos se atraem. Corpos com cargas de mesmo sinal se repelem.

(O trabalho de Franklin sobre eletricidade é em boa parte responsável pela existência dos Estados Unidos. Como embaixador na França, não foram somente sua espirituosidade, charme e argúcia política, mas sua estatura como cientista, o que lhe permitiu recrutar a ajuda francesa tão crucial para o sucesso da Revolução Americana.)

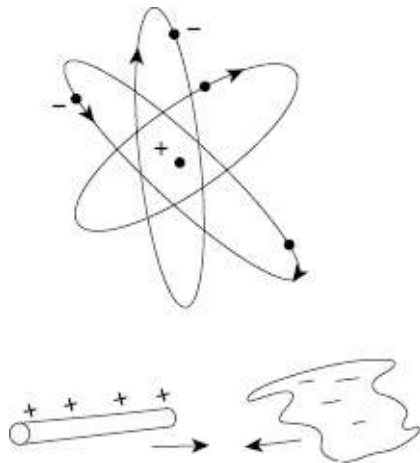



FIGURA 4.3 Cargas positivas e negativas.

Sabemos agora que os átomos têm um núcleo carregado positivamente composto de prótons de carga positiva (e nêutrons sem carga elétrica). Os elétrons, que possuem carga negativa de igual magnitude à do próton, cercam o núcleo. O número de elétrons de um átomo é igual ao número de prótons, de modo que o átomo como um todo não tem carga elétrica. Quando dois corpos são friccionados entre si, são os elétrons que passam de um para o outro.

Um bastão de vidro friccionado com um pano de seda, por exemplo, adquire carga positiva porque os elétrons do vidro estão presos com menos força que os da seda. Portanto, alguns elétrons passam do vidro para a seda. A seda, tendo agora mais elétrons que prótons, adquire carga negativa e é atraída pelo vidro carregado positivamente. Dois pedaços de seda com carga negativa haveriam de repelir-se mutuamente.

Uma fórmula simples, a lei de Coulomb, nos informa a intensidade da força elétrica que um corpo carregado (ou “carga”) exerce sobre outro. Com ela calculam-se as forças de qualquer arranjo de cargas. Essa era a história inteira da força elétrica – nada mais havia a ser dito, ou assim pensava a maioria dos físicos no começo do século XIX.

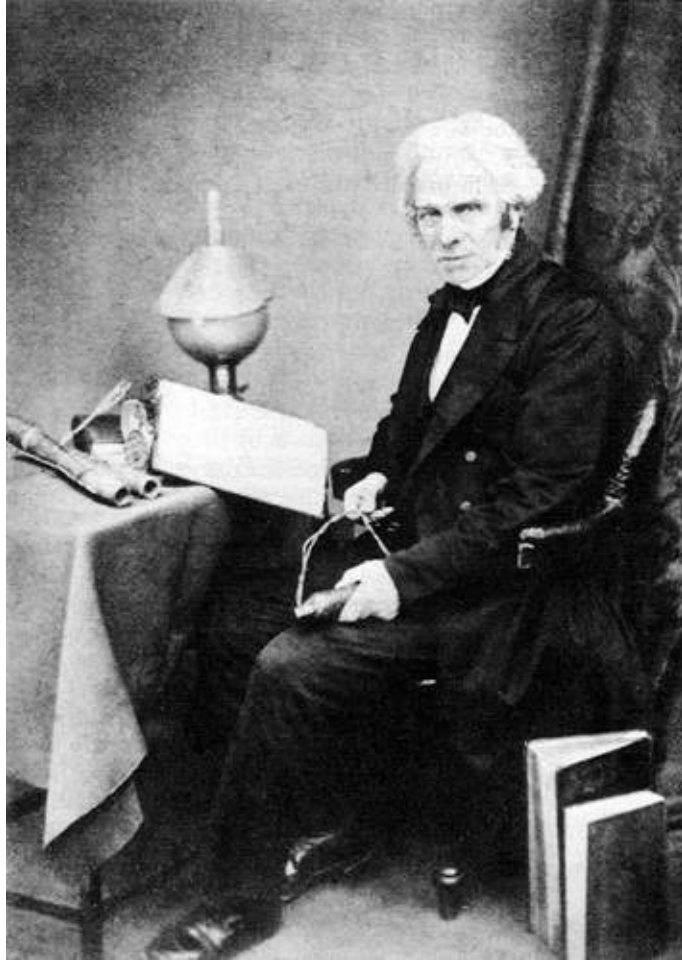



FIGURA 4.4 Michael Faraday. Cortesia Stockton Press.

MICHAEL FARADAY, porém, achava a força elétrica intrigante. Vamos contar um pouco mais de história. Em 1805, aos catorze anos, Faraday, filho de um ferreiro, era aprendiz de um encadernador de livros. Rapaz curioso, ele era fascinado por algumas palestras de ciência popular dadas por sir Humphrey Davy. Fez anotações cuidadosas, encadernou-as formando um livro, apresentou-as a sir Humphrey e pediu um emprego em seu laboratório. Embora contratado como assistente subalterno, Faraday logo obteve permissão para tentar alguns experimentos próprios.

Como, perguntava-se Faraday, um corpo pode exercer força sobre outro através do espaço vazio? O fato de a matemática da lei de Coulomb predizer corretamente o que era possível observar não o satisfazia. (Nada de "*Hypothesis*

non fingo” para ele.) Assim, postulou que uma carga cria um “campo” elétrico no espaço ao seu redor, e é esse campo físico que exerce forças sobre outras cargas. Faraday representou seu campo por linhas contínuas que saíam da carga positiva e chegavam à carga negativa. Na região onde as linhas eram mais densas, a força exercida pelo campo era maior.

A maioria dos cientistas, alegando que a lei de Coulomb já dizia tudo, considerou o conceito de campo supérfluo. A ignorância matemática de Faraday, observaram, exigia que ele pensasse em imagens; o pensamento abstrato sem dúvida era difícil para esse jovem das “classes inferiores”. O conceito de campo foi ridicularizado como “muleta mental de Faraday”.

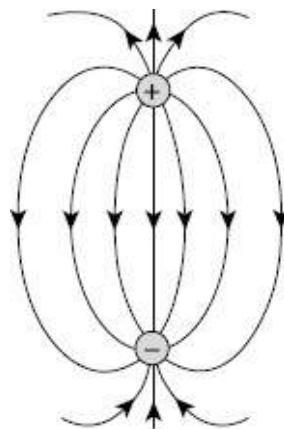



FIGURA 4.5 Campo elétrico em volta de duas cargas.

Na verdade, Faraday foi além, e assumiu que o campo devido a uma carga leva tempo para se propagar. Se, por exemplo, uma carga positiva e uma negativa próxima de igual valor fossem juntadas para se anular mutuamente, o campo desapareceria na sua vizinhança imediata. Mas parecia improvável a Faraday que o campo desaparecesse imediatamente em toda parte.

O campo remoto existiria, pensou ele, por algum tempo mesmo depois que as cargas que o criaram tivessem se cancelado mutuamente e não mais existissem. Se isso fosse verdade, o campo seria uma coisa fisicamente real por si só.

Além disso, raciocinou Faraday, se duas cargas iguais e opostas fossem juntadas e separadas repetidamente, um campo elétrico alternado se propagaria a partir do par oscilante. Mesmo se parassem de oscilar e simplesmente se anulassem, o campo oscilante continuaria se propagando para longe.

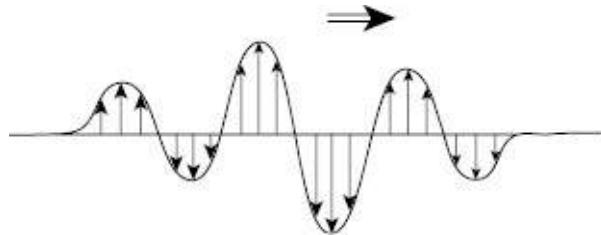



FIGURA 4.6 Um campo elétrico oscilante.

A intuição de Faraday era acertada. Alguns anos depois James Clerk Maxwell, pegando a ideia de campo de Faraday, concebeu um conjunto de quatro equações envolvendo campos que abrangiam todos os fenômenos elétricos e magnéticos. Nós as chamamos de "equações de Maxwell". Elas previam a existência de ondas de campo elétrico e magnético – "ondas eletromagnéticas". Maxwell notou que a velocidade de tais ondas era exatamente a velocidade medida para a luz. Portanto, propôs que a luz era uma onda eletromagnética. Isso foi logo demonstrado, infelizmente após sua morte.

Conforme Faraday previra, o movimento para a frente e para trás de cargas iguais e opostas, na verdade *qualquer* aceleração de carga elétrica, produz radiação eletromagnética. A frequência do movimento das cargas (as repetições por segundo) é a frequência da onda produzida. Movimento de frequência mais alta produz luz violeta e ultravioleta; frequências mais baixas produzem vermelho e infravermelho. Frequências ainda mais altas produzem raios X, frequências muito mais baixas produzem ondas de rádio.

HOJE AS TEORIAS FUNDAMENTAIS da física são todas formuladas em termos de campos. A "muleta mental" de Faraday é um pilar sobre o qual repousa agora toda a física.

A força elétrica – um dos dois aspectos da força eletromagnética – é a única sobre a qual precisamos falar neste livro. Junto com a gravidade, é a única força que normalmente experimentamos. (Embora todos os corpos exerçam forças gravitacionais uns sobre os outros, a gravidade só é significativa quando pelo menos um deles tem massa muito grande, tal como um planeta.) As forças entre átomos são elétricas.

Quando tocamos alguém, a pressão do nosso toque é uma força elétrica. Os elétrons nos átomos da nossa mão repelem os elétrons nos átomos da outra pessoa. Pegue o telefone e ligue para alguém, e é a força elétrica que transmite a mensagem pelos fios, em fibras ópticas, e pelo espaço. Os átomos que compõem matéria sólida são mantidos coesos por forças elétricas. Forças elétricas são responsáveis por toda a química e portanto são a base de toda a biologia. Vemos, ouvimos, cheiramos, saboreamos e tocamos com forças elétricas. Os processos neurológicos em nosso cérebro são eletroquímicos, portanto, em última instância, elétricos.

Será que nosso pensamento, nossa consciência, pode ser em última instância explicado totalmente em termos da eletroquímica que tem lugar em nosso cérebro? Será que nossa sensação de estar consciente é "meramente" uma manifestação de forças elétricas? Alguns acreditam que sim. Outros alegam que há na consciência algo a mais que eletroquímica. Esse é um assunto que exploramos adiante, e a mecânica quântica é relevante.

Há forças na natureza além da gravidade e da força eletromagnética. Mas, ao que parece, apenas outras duas: as chamadas "força forte" e "força fraca". Ambas envolvem interações das partículas que formam o núcleo atômico (e objetos criados por um instante em colisões de partículas com altas energias). Elas essencialmente não exercem efeito além da dimensão do núcleo atômico. Não serão importantes neste livro.

Energia

Energia é um conceito que permeia a física, a química, a biologia e a geologia, bem como a tecnologia e a economia. Guerras têm sido travadas em torno da energia química armazenada no solo. O aspecto crucial é que, embora sua forma possa mudar, a quantidade *total* de energia permanece constante. Isso é chamado de "conservação da energia". Mas o que é energia? Vamos defini-la apontando várias de suas diferentes formas.

Antes de tudo, há a energia do movimento. Quanto maior a massa e a velocidade de um objeto em movimento, maior é a sua "energia cinética". A energia devida ao movimento de objetos é a energia cinética.

Quanto mais cai uma pedra, mais depressa ela se move e maior a sua energia cinética. Uma pedra sustentada a certa altura tem *potencial* para ganhar certa velocidade, certa energia cinética. Ela tem "energia potencial" gravitacional, que é maior para uma massa maior ou uma altura mais elevada. A soma da energia cinética e da energia potencial da pedra é sua energia *total*, que permanece constante à medida que a pedra cai. Esse é um exemplo de conservação de energia.

É claro que, depois que a pedra atinge o chão, ela tem energia cinética zero e energia potencial zero. Quando ela faz contato com o solo, a energia da pedra em si não é conservada. Mas a energia *total* é conservada. No impacto, a energia da pedra é passada para o movimento aleatório interno dos átomos do solo e da própria pedra. Esses átomos agora oscilam com uma agitação maior. O movimento aleatório desses átomos é a descrição microscópica da energia térmica (calor). No ponto atingido pela pedra, o chão fica mais quente. A energia transmitida aos átomos oscilantes é exatamente igual à energia perdida pela pedra no impacto.

Embora a energia total seja conservada quando a pedra para, a energia *disponível para uso* diminui. A energia cinética de pedras em queda, ou água caindo, pode, por exemplo, ser usada para girar uma roda. Mas, quando a energia passa para o movimento aleatório dos átomos, fica indisponível para nós, exceto, possivelmente, como energia térmica. Em qualquer processo físico, alguma energia se torna indisponível. Quando por razões ambientais somos intimados a "poupar" energia, estamos sendo solicitados a usar menos energia *disponível*.

Existe apenas um tipo de energia cinética, mas há muitos tipos de energia potencial. A energia daquela pedra sustentada a certa altura é energia potencial gravitacional. Uma mola comprimida ou um elástico esticado têm energia potencial elástica. A energia elástica da mola pode, por exemplo, ser convertida em energia cinética se a mola lançar uma pedra para cima.

Quando objetos de carga elétrica positiva e negativa são mantidos a certa distância um do outro, eles têm energia potencial elétrica. Se forem soltos, voam um em direção ao outro com velocidade e energia cinética crescentes. Planetas girando ao redor do Sol ou elétrons orbitando um núcleo atômico têm tanto energia cinética quanto potencial.

A energia química de um frasco com moléculas de hidrogênio e oxigênio é maior que a energia que essas moléculas teriam se estivessem unidas na forma de água à mesma temperatura. Se uma faísca atingisse essa mistura hidrogênio-oxigênio, a energia maior apareceria como energia cinética das moléculas de água resultantes. O vapor de água seria portanto quente. A energia química armazenada na mistura hidrogênio-oxigênio se transformaria em energia térmica.

A energia nuclear é análoga à energia química, com a exceção de que as forças envolvidas nos prótons e nêutrons que formam o núcleo incluem forças nucleares além das elétricas. Um núcleo de urânio tem uma energia potencial maior que os produtos da fissão em que ele se decompõe. Tal energia potencial maior se transforma na energia cinética dos produtos da fissão. Essa energia cinética é energia térmica e pode ser usada para fazer vapor com a finalidade de girar turbinas que movem geradores para produzir energia elétrica. A energia potencial do urânio pode também ser liberada rapidamente como uma bomba.

Quando luz é emitida de um corpo quente incandescente, a energia vai para o campo de radiação eletromagnética, e o corpo incandescente esfria, a menos que lhe seja fornecida energia adicional. Quando um único átomo emite luz, ele vai para um estado de energia mais baixa.

Quantas formas de energia existem? Isso depende de como se conta. A energia química, por exemplo, é em última análise energia elétrica, embora com frequência seja conveniente classificá-la em separado. Pode haver formas de energia que ainda não conhecemos. Alguns anos atrás descobriu-se que a expansão do Universo não está ficando mais lenta, como geralmente se acreditava – está acelerando. A energia que causa essa aceleração tem um nome, “energia escura”, mas ainda há em torno dela mais mistério que compreensão.

E quanto à “energia psíquica”? A física não pode reivindicar a patente da palavra “energia”. Ela foi usada muito antes de ser introduzida na física no começo do século XIX. Se a “energia psíquica” pudesse ser convertida numa energia tratada pela física, seria uma forma da energia da qual estamos falando. Não existe, é claro, nenhuma evidência de aceitação geral para isso.

Relatividade

> Alice riu. “Não adianta tentar”, disse ela. “*Não se pode* acreditar em coisas impossíveis.”
>
> “Ouso dizer que você não tem muita prática”, disse a Rainha. “Quando eu tinha a sua idade, sempre fazia isso durante meia hora por dia. Porque às vezes cheguei a acreditar em seis coisas impossíveis antes do café da manhã.”
>
> LEWIS CARROLL, *Através do Espelho e o que Alice encontrou por lá*

QUANDO A LUZ se tornou aceita como onda, assumiu-se que algo devia estar ondulando. Campos elétricos e magnéticos seriam portanto distorções nesse meio ondulatório. Uma vez que os corpos materiais se moviam através dele sem resistência, era um meio etéreo e foi chamado de “éter”. Como recebemos luz das estrelas, o éter presumivelmente permeava o Universo. O movimento em relação a esse éter definiria uma velocidade *absoluta*, algo sem significado sem um éter que estabelecesse um “ponto de amarração” no Universo.

Na década de 1890, Albert Michelson e Edward Morley se propuseram a determinar a velocidade do nosso planeta através do éter universal. Um barco que se move no mesmo sentido das ondas as vê passar mais lentamente do que quando se move no sentido oposto a elas. Pela diferença entre as duas velocidades das ondas, pode-se determinar a velocidade do movimento do barco na água. Esse foi essencialmente o experimento que Michelson e Morley fizeram com as ondas de luz.

Para sua surpresa, a Terra parecia não se mover em absoluto. Pelo menos, a velocidade da luz que mediram era a mesma em todas as direções. Tentativas engenhosas de desvendar esse resultado usando a teoria eletromagnética fracassaram.

Albert Einstein adotou outra postura e cortou o nó górdio da questão. Arrojadamente *postulou* o fato observado: que a velocidade da luz é a mesma

não importando a velocidade com que o observador se mova. Ele considerou esse estranho resultado uma nova propriedade da natureza. Dois observadores, embora movendo-se com velocidades diferentes, mediriam a mesma velocidade para um mesmo feixe de luz passando por eles. A velocidade da luz (no vácuo) é portanto uma constante universal, chamada "*c*".

Com a velocidade do feixe de luz sendo a mesma para todos os observadores, não existe velocidade absoluta a ser medida. Qualquer observador, qualquer que seja sua velocidade constante, podia se considerar em repouso. Então não existe velocidade absoluta; apenas velocidades *relativas* têm significado. Por essa razão, chamamos a teoria de Einstein de "teoria da relatividade".

Usando apenas álgebra simples, Einstein deduziu outras previsões testáveis a partir de seu postulado. A previsão mais importante para nós neste livro é que nenhum objeto, nenhum sinal, nenhuma informação, pode viajar a uma velocidade maior que a da luz. Outra previsão é que a massa é uma forma de energia que pode ser convertida em outras formas de energia. Isso pode ser resumido como $E = mc^2$. Ambas as previsões foram confirmadas, às vezes de forma espetacular.

A previsão da teoria da relatividade mais difícil de acreditar é que a passagem do tempo é relativa: vemos o tempo passando mais devagar para um objeto movendo-se rapidamente do que para outro que esteja em repouso.

Suponha que uma mulher de vinte anos viaje a uma estrela distante num foguete espacial super-rápido, deixando seu irmão gêmeo na Terra por trinta anos. Quando ela volta, seu irmão, tendo envelhecido trinta anos, é agora um homem de meia-idade, com cinquenta anos. Ela, para quem o tempo passou mais devagar por causa da sua velocidade de, digamos, 95% da velocidade da luz, envelheceu apenas dez anos. Seria relativamente jovem, com trinta anos. A viajante seria vinte anos mais nova, em todos os sentidos físicos e biológicos, que seu gêmeo que ficou em casa.

Esse “paradoxo dos gêmeos” foi levantado bem cedo como uma suposta refutação da teoria de Einstein. Ela não poderia ter considerado *a si própria* em repouso, enquanto seu irmão fazia a viagem com enorme velocidade? Então, ele seria mais novo que ela. A teoria, alegava-se, era inconsistente. Não é bem assim. A situação não é simétrica. Somente observadores movendo-se com velocidade *constante* (velocidade constante num sentido constante) podem se considerar em repouso. Isso não valia para a viajante, que precisou dar meia-volta e acelerar na estrela distante para voltar para casa. (Pelas forças atuando sobre ela ao acelerar, ela podia saber que não estava em repouso.)

Embora não seja tecnicamente plausível construir foguetes que carreguem as pessoas numa velocidade próxima à da luz, a teoria da relatividade tem sido extensivamente testada e confirmada. A maioria dos testes tem sido realizada com partículas subatômicas. Mas a teoria também foi checada comparando relógios precisos carregados em viagens aéreas ao redor do mundo com outros que ficaram em casa. Na volta, os relógios viajantes eram “mais novos”. Registravam um pouco menos de tempo – exatamente na quantidade prevista. A validade da teoria da relatividade está tão bem estabelecida atualmente que apenas um teste extremamente desafiador teria autoridade para questioná-la. Se você ler acerca de um teste de “relatividade”, é provável que ele se relacione à teoria da relatividade *geral*, a teoria da gravidade de Einstein. O nome completo da teoria da qual estamos falando é teoria da relatividade *especial*.

É difícil acreditar nas coisas estranhas que a teoria da relatividade de Einstein nos conta. De que alguém poderia, em princípio, ficar mais velho que sua mãe. Mas aceitar o fato, hoje experimentalmente estabelecido, de que sistemas em movimento envelhecem menos é uma boa prática para acreditar nas coisas bem mais estranhas que a mecânica quântica nos conta.

Agora estamos prontos para começar a falar dessas coisas estranhas.

Olá, mecânica quântica

> O Universo começa a parecer mais um grande pensamento do que uma grande máquina.
>
> SIR JAMES JEANS

NO FIM DO SÉCULO XIX, a busca pelas leis básicas da natureza parecia próxima do seu objetivo. Havia uma sensação de dever cumprido. A física apresentava uma cena ordenada que se encaixava apropriadamente no estado de espírito vitoriano da época.

Objetos tanto sobre a Terra quanto nos céus comportavam-se de acordo com as leis de Newton. Assim, presumivelmente, comportavam-se também os átomos. A natureza dos átomos não estava clara. Mas para a maioria dos cientistas o resto do serviço de descrição do Universo parecia um preenchimento de detalhes da Grande Máquina.

Será que o determinismo newtoniano contrariava o livre-arbítrio? A física deixaria tais perguntas para a filosofia. Definir o território que os físicos consideravam seu parecia algo direto. Pouco havia para motivar uma busca de significado mais profundo por trás das leis da natureza. Mas essa visão de mundo intuitivamente sensata não podia explicar alguns enigmas que os físicos acabavam vendo em seus laboratórios. A princípio, pareciam meros detalhes a ser explorados e resolvidos. Logo, porém, a exploração desafiou aquela confortável visão de mundo. Mas hoje, um século depois, a visão de mundo ainda é questionada.

A física quântica *não substitui* a física clássica do mesmo modo que o sistema centrado no Sol substituiu a concepção anterior com a Terra como centro cósmico. Mais corretamente, a física quântica *abarca* a física clássica como um caso especial. A física clássica geralmente é uma aproximação extremamente

boa para o comportamento de objetos que são muito maiores que átomos. Mas se você escavar fundo o suficiente qualquer fenômeno natural, seja físico, químico, biológico ou cosmológico, dará de encontro com a mecânica quântica. As teorias fundamentais da física, desde a teoria das cordas até o Big Bang, começam todas com a teoria quântica.

A teoria quântica tem sido sujeita a testes que a desafiam há oito décadas. Nenhuma previsão feita pela teoria jamais se revelou errada. Ela é a teoria mais testada de toda a ciência – quanto a isso não tem concorrentes. No entanto, se você levar as implicações da teoria a sério, confrontará um enigma. A teoria nos diz que a realidade do mundo físico depende da nossa *observação* desse mundo. Isso é difícil de acreditar.

Ser difícil de acreditar apresenta um problema: se lhe dizem algo em que você não consegue acreditar, uma resposta provável é: “Eu não entendo.” Nesse caso, pode ser que você na verdade entenda mais do que pensa. Estamos confrontando um enigma.

Há também uma tendência de reinterpretar o que é dito de modo a parecer razoável. Não use a razoabilidade como teste de compreensão. Mas aqui está um teste: Niels Bohr, um dos fundadores da mecânica quântica, advertiu que, a menos que fique chocado com a mecânica quântica, você não a compreendeu.

Embora nossa apresentação possa ser novidade, os fatos experimentais que descrevemos e as explicações da teoria quântica que damos para eles são completamente inquestionáveis. Pisamos além desse terreno firme quando exploramos a *interpretação* da teoria e, portanto, o encontro da física com a consciência. O sentido mais profundo da mecânica quântica está *cada vez mais* em discussão.

Não é necessário um conhecimento técnico para chegar à fronteira onde a física reúne questões que parecem estar além da própria física e onde os físicos não podem alegar competência exclusiva. Uma vez lá, você pode tomar partido no debate.

5. Como o quantum foi *forçado* para dentro da física

Foi um ato de desespero.

MAX PLANCK

OS CURSOS DE FÍSICA raramente são apresentados historicamente. A disciplina introdutória de mecânica quântica é a exceção. Para que os estudantes vejam por que aceitamos uma teoria que conflita tão violentamente com o senso comum, eles precisam saber como os físicos foram arrastados da sua complacência do século XIX pelos fatos brutais observados em seus laboratórios.

O revolucionário relutante

Na semana final do século XIX, Max Planck sugeriu algo ultrajante: as leis mais fundamentais da física estavam sendo violadas. Era o primeiro indício da revolução quântica, de que a visão de mundo que agora chamamos de "clássica" tinha de ser abandonada.

Max Planck, filho de um distinto professor de direito, era cuidadoso, respeitável e reservado. Vestia roupas escuras e suas camisas eram rigidamente engomadas. Criado na estrita tradição prussiana, Planck respeitava a autoridade, tanto na sociedade quanto na ciência. Não só as pessoas deviam seguir rigorosamente as leis. A matéria física também devia. Não era o revolucionário típico.

Em 1875, quando o jovem Max Planck anunciou seu interesse em física, o chefe do seu departamento de física sugeriu que ele estudasse algo mais empolgante. A física, disse ele, estava praticamente completa: "Todas as descobertas importantes já foram feitas." Resoluto, Planck completou seus estudos em física e atuou por alguns anos como *Privatdozent*, um professor aprendiz que recebia apenas a pequena remuneração paga pelos alunos que frequentavam suas aulas.

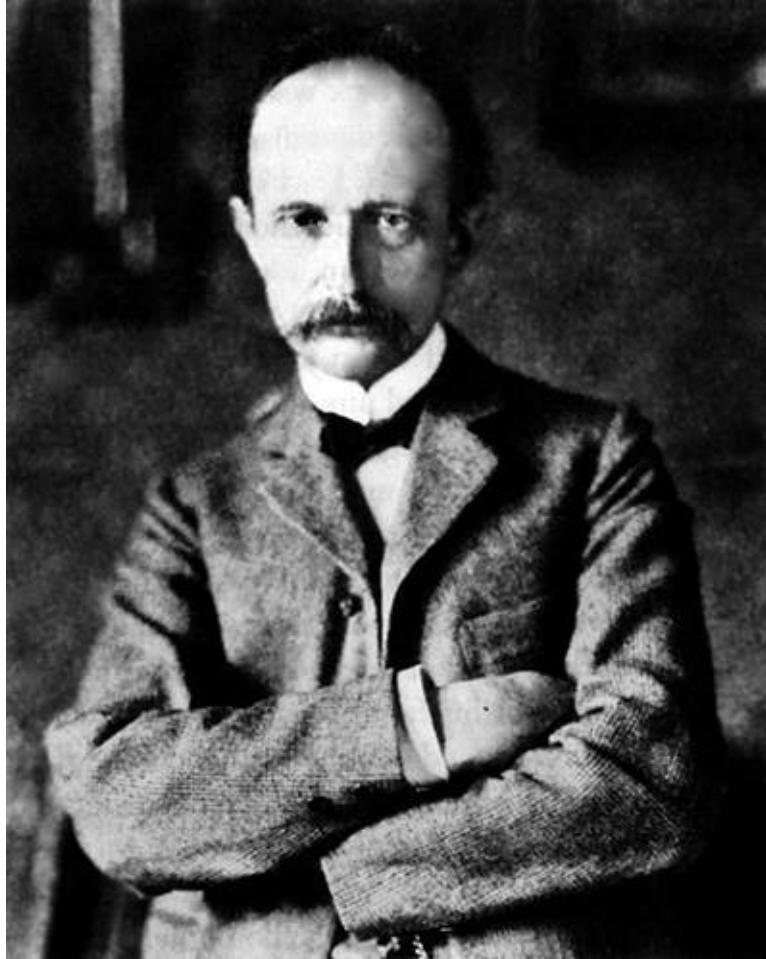



FIGURA 5.1 Max Planck.

Planck optou por trabalhar na área mais comportada da física, a termodinâmica, o estudo do calor e sua interação com outras formas de energia. Seu trabalho sólido, mas pouco espetacular, valeu-lhe o professorado. Conta-se que a influência de seu pai pode ter ajudado.

Um fenômeno incômodo inexplicado em termodinâmica era a radiação térmica: o espectro, as cores da luz emitida por corpos quentes. O problema era uma das duas "nuvens escuras no horizonte" de Kelvin. Planck se propôs a resolvê-lo.

PRIMEIRO VAMOS DAR uma olhada em alguns aspectos que pareciam razoáveis, e então passar ao problema. Que um atiçador quente deva incandescer parece

óbvio. Na virada do século, embora a natureza dos átomos, e até mesmo a existência deles, fosse pouco clara, os elétrons tinham acabado de ser descobertos. Presumivelmente, essas pequenas partículas carregadas oscilavam num corpo quente e portanto emitiam radiação eletromagnética. Como a radiação era a mesma, não importando de que material proviesse, parecia um aspecto fundamental da natureza e, por conseguinte, importante de entender.

Parecia razoável que, à medida que um pedaço de ferro ficasse mais quente, seus elétrons oscilassem com mais intensidade e, presumivelmente, com maior velocidade, significando uma frequência mais alta. Portanto, quanto mais quente o metal, mais intenso o brilho e mais alta a frequência. À medida que o ferro fica mais quente, sua cor passa do infravermelho invisível para um vermelho visível, laranja, e o metal acaba ficando branco quando a luz emitida cobre toda a gama de frequências visíveis.

Como nossos olhos não enxergam frequências acima do violeta, objetos superquentes, que emitem basicamente no ultravioleta, apareceriam azulados. Na realidade, os materiais na Terra se vaporizam antes de ficar quentes o bastante para atingir uma incandescência azul, mas podemos olhar para o alto e ver estrelas quentes azuis. Mesmo objetos frios "incandescem", embora fracamente e com frequências baixas. Traga a palma da mão para perto da sua bochecha e sinta o calor da luz infravermelha que a sua mão emite. O céu lança sobre nós uma radiação invisível de micro-ondas que restou da explosão do Big Bang.

Na figura 5.2 esboçamos a intensidade real de radiação dos 6 mil graus Celsius da superfície do Sol em diferentes frequências, que simplesmente rotulamos como cores. Um objeto mais quente emite mais luz em todas as frequências, e sua intensidade máxima está numa frequência mais elevada. Mas a intensidade sempre cai em frequências muito altas.

A linha tracejada mostra o problema. É a intensidade teórica calculada com as leis da física aceitas em 1900. Observe que a teoria e as observações experimentais estavam de acordo no infravermelho. Mas em frequências mais altas a física clássica não só dava a resposta errada, dava uma resposta *ridícula*.

Ela predizia uma intensidade luminosa sempre crescente em frequências além do ultravioleta.

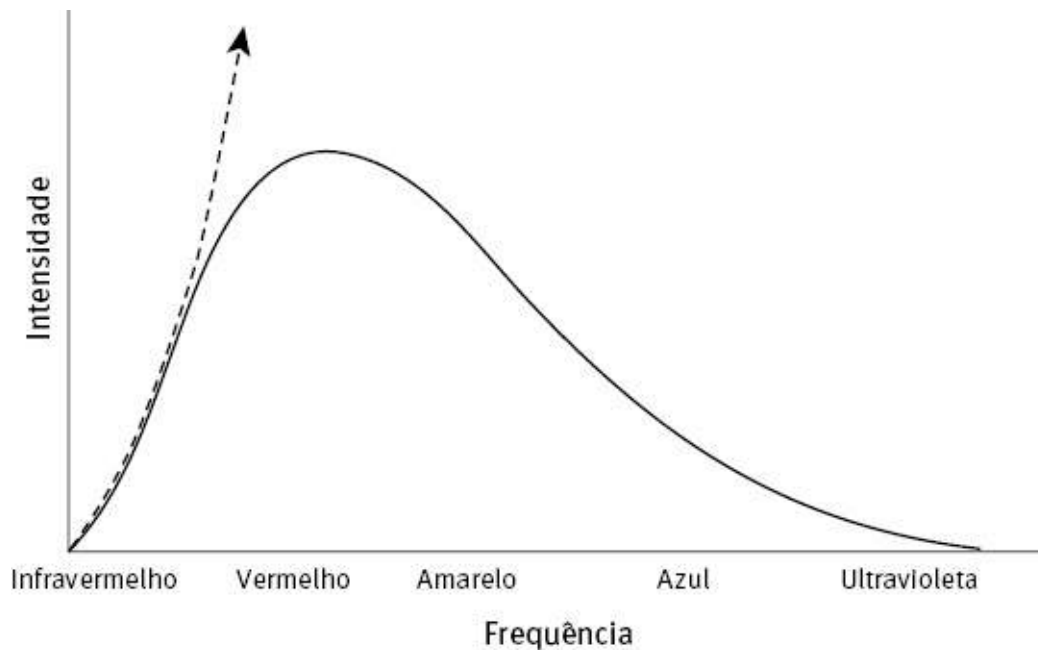



FIGURA 5.2 Radiação térmica a 6 mil graus Celsius (linha cheia)comparada com a previsão clássica (linha tracejada).

Se isso fosse verdade, todo objeto perderia instantaneamente seu calor irradiando uma explosão de energia em frequências além do ultravioleta. Essa dedução constrangedora era ridicularizada como a "catástrofe do ultravioleta". Mas ninguém era capaz de dizer onde o raciocínio aparentemente correto que levava a ela estava errado.

PLANCK LUTOU DURANTE anos para deduzir uma fórmula a partir da física clássica que se encaixasse nos dados experimentais. Frustrado, resolveu trabalhar no problema de trás para a frente. Primeiro tentaria *adivinhar* uma fórmula que estivesse de acordo com os dados e então, tendo-a como pista, tentaria desenvolver uma teoria adequada. Numa única noite, estudando os dados que outros lhe haviam dado, encontrou uma fórmula relativamente simples que funcionava perfeitamente.

Se Planck colocasse a temperatura do corpo, sua fórmula dava a intensidade de radiação correta em todas as frequências. Sua fórmula precisava de um "fator de correção" para se encaixar nos dados, um número que ele chamou de "*h*". Atualmente o chamamos de "constante de Planck" e o reconhecemos como uma propriedade fundamental da natureza, como a velocidade da luz.

Tendo sua fórmula como pista, Planck buscou explicar a radiação térmica em termos dos princípios básicos da física: nos modelos diretos da época, um elétron começaria a vibrar se fosse atingido por um átomo vizinho oscilando num metal quente. A pequena partícula carregada passaria então a perder gradualmente sua energia emitindo luz. Traçamos um gráfico dessa perda de energia na figura 5.3. Da mesma maneira, um pêndulo formado por uma massa presa a um fio, ou uma criança num balanço, depois de receber um impulso, perde continuamente energia devido ao atrito e à resistência do ar.

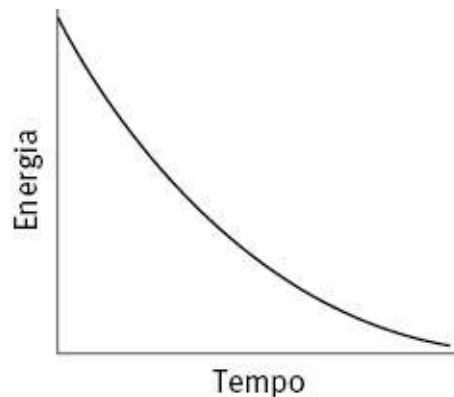



FIGURA 5.3 Perda de energia de uma partícula carregada segundo a física clássica.

No entanto, toda descrição de elétrons irradiando energia segundo a física da época levava à mesma predição maluca, a catástrofe do ultravioleta. Após uma longa batalha, Planck aventou uma premissa que violava os princípios da física universalmente aceitos. De início, ele não a levou a sério. Mais tarde a chamou de "ato de desespero".

Max Planck assumiu que um elétron podia irradiar energia apenas em nacos, em "quanta" (plural de quantum). Mais ainda, cada quantum teria uma energia

igual ao número *h* de sua fórmula multiplicado pela frequência de vibração do elétron.

Comportando-se dessa maneira, o elétron vibraria por algum tempo sem perder energia para a radiação. Então, aleatoriamente, e *sem causa*, sem uma força aplicada, subitamente irradiaria um quantum de energia na forma de um pulso de luz. (Elétrons também ganhariam energia de átomos quentes por meio desses "saltos quânticos".) Na figura 5.4 traçamos um gráfico como exemplo de tal perda de energia em passos súbitos. A linha tracejada repete a perda de energia gradual, predita pela física clássica, da figura 5.3.

Planck estava permitindo que os elétrons violassem tanto as leis do eletromagnetismo como as equações universais do movimento de Newton. Somente com essa tresloucada premissa conseguia chegar à fórmula que tinha adivinhado, a fórmula que descrevia corretamente a radiação térmica.

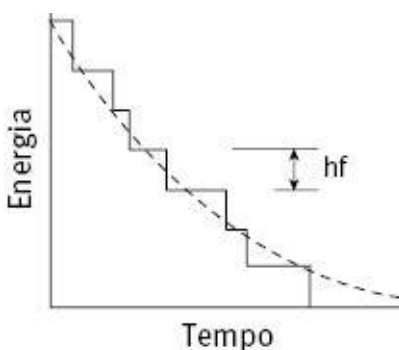



FIGURA 5.4 Perda de energia de uma partícula carregada segundo Planck.

Se esse comportamento de saltos quânticos é de fato uma lei da natureza, deveria aplicar-se a tudo. Por que, então, vemos as coisas ao nosso redor comportando-se de forma suave e gradativa? Por que não vemos crianças em balanços mudarem de repente o movimento de balançar em saltos quânticos? É uma questão de números, e *h* é um número extremamente pequeno.

Não só *h* é pequeno, como a frequência de uma criança movendo-se para a frente e para trás num balanço é muito mais baixa que aquela com que um elétron vibra; os passos quânticos de energia (*h* vezes a frequência) são muito menores para a criança. E, é claro, a energia total de uma criança balançando é

muito maior que a de um elétron. Portanto, o número de quanta envolvidos no movimento da criança é muito, muito maior que no movimento do elétron. Um salto quântico, a mudança de energia no valor de um único quantum, é portanto pequeno demais para ser visto numa criança brincando num balanço.

MAS VOLTEMOS AOS TEMPOS de Planck e à reação à solução proposta por ele para o problema da radiação térmica. Sua fórmula encaixava-se bem nos dados experimentais, mas sua explicação parecia gerar mais confusão do que o problema que se propunha a resolver. A teoria de Planck parecia tola. Ninguém riu, pelo menos em público – Herr Professor Planck era um homem importante demais para isso. Sua sugestão de saltos quânticos foi simplesmente ignorada.

Os físicos não estavam dispostos a questionar as leis fundamentais da mecânica e do eletromagnetismo. Mesmo que as leis clássicas fornecessem uma previsão ridícula para a luz emitida por corpos incandescentes, esses princípios básicos pareciam funcionar em todas as outras circunstâncias. E faziam sentido. Os colegas de Planck sentiam que uma solução razoável acabaria por ser encontrada. O próprio Planck concordou e prometeu buscar uma. A revolução quântica chegou com um pedido de desculpas, e quase despercebida.

Em anos posteriores, Planck chegou mesmo a recear as consequências *sociais* negativas da mecânica quântica. Liberar os constituintes fundamentais da matéria das regras de um comportamento adequado poderia parecer liberar as pessoas da responsabilidade e do dever. O revolucionário relutante teria gostado de cancelar a revolução que deflagrara.

O perito técnico de terceira classe

Os pais do pequeno Albert Einstein ficaram preocupados com a possibilidade de retardo mental quando ele demorou a começar a falar. Mais tarde, porém, ele se tornou um estudioso ávido e independente de temas que o interessavam. Apesar disso, sua aversão por decorar a matéria no *Gymnasium* (ensino médio) fez com que não se saísse bem. Solicitado a sugerir uma profissão que Albert pudesse seguir, o diretor-geral predisse confiantemente: “Não faz diferença; ele nunca será um sucesso em nada.”

Os pais de Einstein mudaram da Alemanha para a Itália depois que os negócios eletroquímicos da família foram à falência. O novo negócio na Itália não foi muito melhor. O jovem Einstein logo ficou por conta própria. Fez o exame de ingresso ao Instituto Politécnico de Zurique, mas não passou. Finalmente foi admitido no ano seguinte. Ao graduar-se, não teve êxito ao tentar um posto como *Privatdozent*. Teve a mesma sorte ao candidatar-se a um lugar como professor no *Gymnasium*. Por algum tempo, Einstein se sustentou como tutor de alunos com problemas no ensino médio. Por fim, mediante a influência de um amigo, conseguiu um emprego no escritório de patentes suíço.

Seus deveres como perito técnico de terceira classe eram escrever sumários dos pedidos de patente para que seus superiores os usassem ao tomar uma decisão. Einstein gostava do trabalho, que não ocupava todo o seu tempo. De olho na porta para o caso de um superior entrar, ele também trabalhava nos seus próprios projetos.

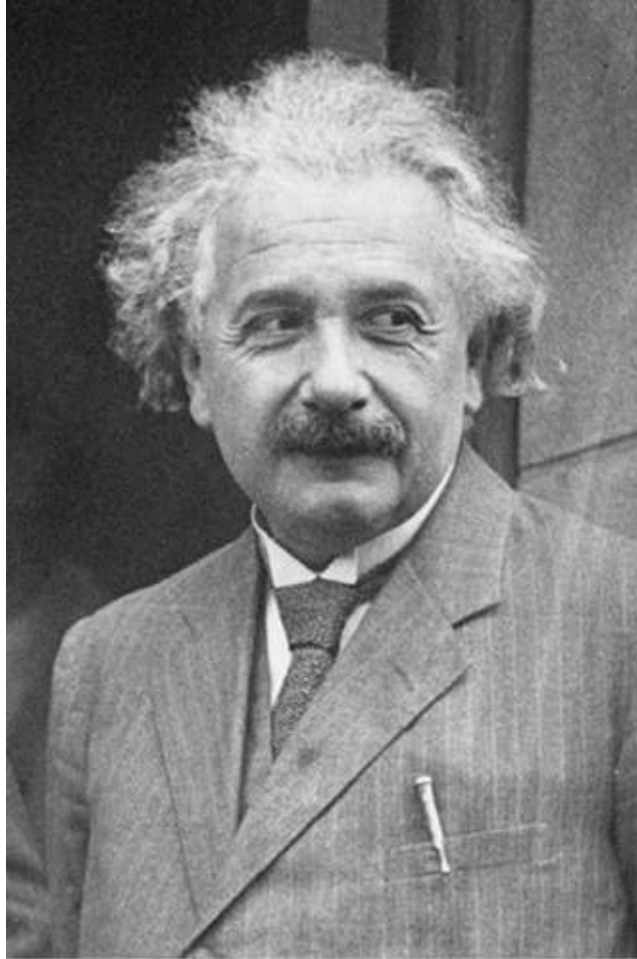



FIGURA 5.5 Albert Einstein. Cortesia Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) e Universidade Hebraica de Jerusalém.

Inicialmente, Einstein continuou a se dedicar ao tema de sua tese de doutorado, a estatística de átomos agitando-se num líquido. Esse trabalho logo se tornou a melhor evidência da natureza atômica da matéria, algo que ainda era discutido na época. Einstein ficou surpreso com a semelhança matemática entre a equação para o movimento dos átomos e a lei de radiação de Planck. E perguntou-se: será que a luz poderia ser não só matematicamente parecida com os átomos, mas também fisicamente parecida com eles?

Se assim fosse, poderia a luz, como a matéria, vir em pedaços compactos? Talvez os pulsos de energia luminosa emitidos num dos saltos quânticos de Planck não se propagassem em todas as direções como Planck presumia. Poderia

essa energia ficar confinada a uma região pequena? Poderia haver átomos de luz assim como átomos de matéria?

Einstein especulou que a luz é um fluxo de bocados compactos, “fótons” (um termo que veio mais tarde). Cada fóton teria uma energia igual ao quantum de Planck, *hf* (a constante de Planck, *h*, multiplicada pela frequência da luz). Os fótons seriam criados quando os elétrons emitissem luz. Os fótons desapareceriam quando a luz fosse absorvida.

Em busca de uma evidência de que essa especulação pudesse estar correta, Einstein procurou algo que pudesse exibir um aspecto granular da luz. Não foi difícil achar. O “efeito fotoelétrico” já era conhecido havia quase vinte anos. Luz incidindo sobre um metal podia fazer com que elétrons pulassem fora dele.

Era uma situação confusa. Ao contrário da radiação térmica, em que uma regra universal valia para todos os materiais, o efeito fotoelétrico era diferente para cada substância. Além disso, os dados eram imprecisos e não particularmente reprodutíveis.

Mas que se danassem os dados ruins. *Ondas* luminosas difusas não deveriam ejetar elétrons do metal de jeito nenhum. Os elétrons são fortemente coesos. Ao mesmo tempo que são livres para se mover dentro do metal, não podem realmente escapar dele. Podemos “ferver” elétrons, tirando-os de um metal, mas é necessária uma temperatura muito alta. Podemos arrancar elétrons de um metal, mas é necessário um campo elétrico muito intenso. No entanto, uma luz tênue, correspondente a um campo elétrico extremamente fraco, ainda assim expulsa elétrons. Quanto mais tênue a luz, menos elétrons. Mas não importava quão tênue fosse, alguns elétrons sempre eram ejetados.

Einstein colheu ainda mais informação a partir dos dados ruins. Os elétrons saltavam com alta energia quando a luz era ultravioleta ou azul. Com a luz amarela, de frequência mais baixa, sua energia era menor. A luz vermelha geralmente não ejetava elétrons. Quanto mais alta a frequência da luz, maior a energia dos elétrons emitidos.

O efeito fotoelétrico era justamente aquilo de que Einstein precisava. A lei de radiação de Planck implicava que a luz era emitida em pulsos, quanta, cuja energia era maior para luz de frequência mais alta. Se os quanta fossem realmente bocados compactos, toda a energia de cada fóton podia ser concentrada num único elétron. Um único elétron absorvendo todo um fóton ganharia um quantum inteiro de energia *hf*.

A luz, especialmente a luz de alta frequência, com seus fótons de alta energia, poderia então dar aos elétrons energia suficiente para saltar fora do metal. Quanto mais alta a energia de um fóton, maior a energia do elétron ejetado. Para luz abaixo de certa frequência, seus fótons teriam energia insuficiente para remover um elétron do metal, e nenhum elétron seria ejetado.

Einstein disse isso claramente em 1905:

> Segundo a premissa presentemente proposta, a energia num feixe de luz emanando de uma fonte puntiforme não é distribuída continuamente por volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço, que se movem sem se subdividir e que são absorvidos e emitidos apenas como unidades.

Supondo que a luz vem na forma de um fluxo de fótons e que um único elétron absorve toda a energia de um fóton, Einstein usou a conservação da energia para deduzir uma fórmula simples que relaciona a frequência da luz à energia dos elétrons ejetados. Colocamos isso sob a forma de gráfico na figura 5.6. Fótons com energia menor que a energia que une os elétrons ao material não conseguem ejetar nenhum elétron.

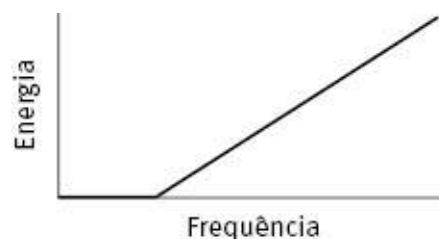



FIGURA 5.6 Energia de elétrons ejetados versus frequência da luz.

Um aspecto surpreendente da hipótese do fóton de Einstein é que a inclinação da reta neste gráfico é simplesmente a constante de Planck, *h*. Até

esse momento, a constante de Planck era apenas um número necessário para ajustar a fórmula de Planck à radiação térmica observada. Não aparecia em nenhum outro lugar na física. Antes da hipótese do fóton de Einstein, não havia motivo para pensar que a ejeção de elétrons pela luz tivesse qualquer coisa a ver com a radiação emitida por corpos quentes. Essa inclinação foi o primeiro indício de que o quantum era universal.

DEZ ANOS DEPOIS do trabalho de Einstein com o efeito fotoelétrico, o físico americano Robert Millikan descobriu que a fórmula de Einstein previa em cada caso "exatamente os resultados observados". No entanto, Millikan chamou de "totalmente insustentável" a hipótese do fóton de Einstein que levava àquela fórmula e de "temerária" a sugestão de Einstein de que a luz vinha em partículas compactas.

Millikan não estava sozinho. A comunidade física recebeu o postulado do fóton "com descrença e ceticismo beirando o escárnio". Não obstante, oito anos depois de propor o fóton, Einstein adquirira considerável reputação como físico teórico por muitas outras realizações e foi indicado para integrar a Academia Prussiana de Ciência. Planck, em sua carta de apoio à indicação, sentiu que precisava defender Einstein: "[Q]ue ele pode às vezes ter errado o alvo em suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz, não pode realmente significar muito contra ele."

Mesmo quando Einstein recebeu o prêmio Nobel em 1922 pelo efeito fotoelétrico, o texto da comenda evitava menção explícita ao fóton, que já tinha dezessete anos mas ainda não era aceito. Um biógrafo de Einstein escreve: "De 1905 a 1923, [Einstein] era um homem isolado pelo fato de ser o único, ou quase o único, a levar a sério o quantum de luz." (Mais adiante neste capítulo contaremos o que aconteceu em 1923.)

EMBORA A REAÇÃO da comunidade física aos fótons de Einstein fosse, em uma palavra, de rejeição, não se tratava de pura teimosia. Havia sido *provado* que a

luz era uma onda espalhada. A luz exibia interferência. Um fluxo de partículas discretas não podia fazer isso.

Vamos recordar nossa análise de interferência no capítulo 4. A luz atravessando uma única fenda ilumina uma tela de maneira mais ou menos uniforme. Abra uma segunda fenda, e surgirá um padrão de faixas escuras cujo espaçamento depende da distância de separação entre as duas fendas. Nos pontos escuros, cristas de ondas de uma fenda chegam junto com vales de ondas da outra. Ondas de uma fenda, portanto, anulam ondas da outra. A interferência mostra que a luz é uma onda espalhada por ambas as fendas.

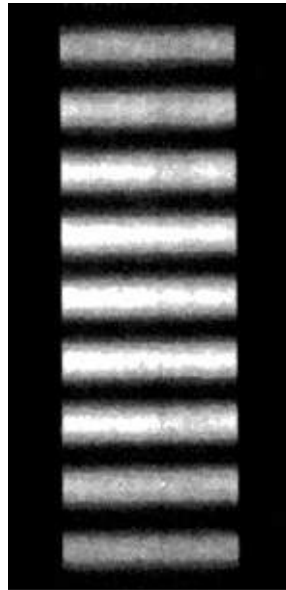



FIGURA 5.7 Um padrão de interferência formado por luz passando através de duas fendas estreitas.

No capítulo 4 mencionamos que o argumento de que pequenas balas não podem causar interferência não era totalmente seguro. Não poderiam elas, de algum modo, *desviar-se* mutuamente de modo a formar faixas claras e escuras? Esse furo no argumento foi resolvido. Agora que sabemos quanta energia cada fóton carrega, podemos saber quantos fótons existem num feixe de dada intensidade. Vemos interferência numa luz tão tênue, de tão baixa intensidade, que no aparato só há um fóton presente de cada vez.

Ao escolher demonstrar a interferência, algo explicável *apenas* em termos de ondas, você pode provar que a luz é uma onda espalhada. No entanto, ao escolher uma demonstração fotoelétrica, você pode demonstrar o oposto: que a luz *não* é uma onda espalhada, mas um fluxo de minúsculos objetos compactos. Parece haver uma inconsistência. (Lembre-se de que algo desse tipo foi visto em Eug Ahne Poc. Nosso visitante podia escolher provar que o casal se distribuíra nas duas choupanas, uma pessoa em cada uma delas, ou que estava concentrado de modo compacto numa choupana única.)

Embora a natureza paradoxal da luz perturbasse Einstein, ele se apegou à sua hipótese do fóton. Declarou que existia um mistério na natureza e que devíamos confrontá-lo. Não pretendeu resolver o problema. E nós não pretendemos resolvê-lo neste livro. O mistério ainda está conosco cem anos depois. Capítulos posteriores focalizam as implicações de podermos escolher provar qualquer uma de duas coisas contraditórias. O mistério se estende além da física para a natureza da observação. Esse é o enigma quântico. Veremos especulações muito doidas sendo atualmente propostas com seriedade por distintos especialistas em física quântica.

Num único ano, 1905, Einstein descobriu a natureza quântica da luz, estabeleceu firmemente a natureza atômica da matéria e formulou a teoria da relatividade. No ano seguinte o escritório suíço de patentes promoveu-o: a perito técnico de *segunda* classe.

O pós-doc

Niels Bohr cresceu numa família afluente e respeitada que alimentava o pensamento independente. Seu pai, um eminente professor de fisiologia da Universidade de Copenhague, interessava-se por filosofia e ciência, e estimulou esses interesses em seus dois filhos. O irmão de Niels, Harald, acabou se tornando um excepcional matemático. Os primeiros anos de Niels Bohr foram estimulantes. Ao contrário de Einstein, ele jamais foi rebelde.

Na faculdade na Dinamarca, Bohr ganhou uma medalha por alguns experimentos inteligentes com fluidos. Mas pulamos para 1912, quando, com seu recente doutorado, Bohr foi para a Inglaterra como "pós-doc", estudante de pós-doutorado.

Nessa época a natureza atômica da matéria tinha se tornado aceita pela maioria, mas a estrutura interna do átomo era desconhecida. Na verdade, estava em discussão. Os elétrons, partículas negativamente carregadas milhares de vezes mais leves que qualquer átomo, haviam sido descobertos uma década antes por J.J. Thompson. Um átomo, sendo eletricamente neutro, devia ter em algum lugar uma carga positiva igual àquela dos seus elétrons negativos, e presumia-se que essa carga positiva contivesse a maior parte da massa do átomo. Como estariam distribuídos os elétrons e a carga positiva do átomo?

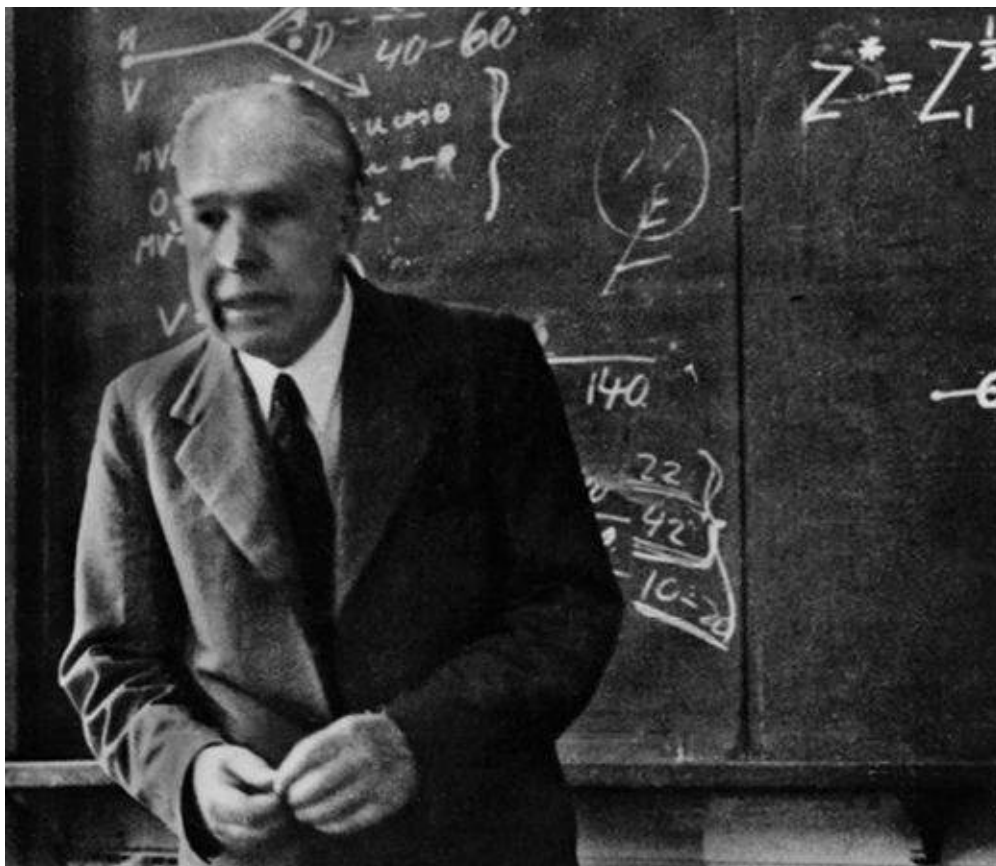



FIGURA 5.8 Niels Bohr. Cortesia Instituto Americano de Física.

Thompson fizera a suposição mais simples: a massiva carga positiva preenchia uniformemente o volume atômico, e os elétrons – um no hidrogênio e quase cem nos átomos mais pesados conhecidos – estavam distribuídos por todo esse recheio positivo, como passas num pudim. Os teóricos tentaram calcular como várias distribuições de elétrons podiam dar a cada elemento suas propriedades características.

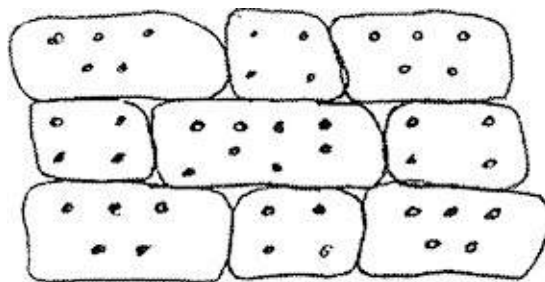



FIGURA 5.9 O modelo atômico do pudim de passas de Thompson.

Havia um modelo concorrente para o átomo. Ernest Rutherford, na Universidade de Manchester, na Inglaterra, explorou o átomo disparando partículas alfa (átomos de hélio despidos de seus elétrons) através de uma lâmina de ouro. E viu algo inconsistente com a massa positiva uniformemente distribuída de Thompson. Cerca de uma partícula alfa em 10 mil era refletida num ângulo grande, às vezes até mesmo para trás. O experimento foi comparado a disparar ameixas através do pudim. Colisões com as pequenas passas (elétrons) não podiam desviar muito uma ameixa (uma partícula alfa) em alta velocidade. Rutherford concluiu que suas partículas alfa estavam colidindo com uma carga positiva do átomo, que estaria concentrada num pequeno aglomerado no centro do átomo, um "núcleo".

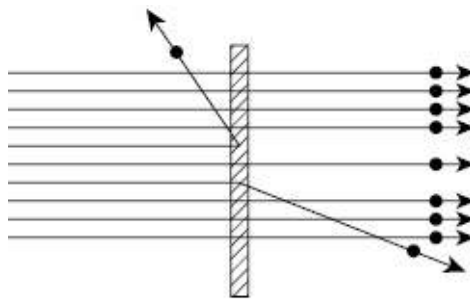



FIGURA 5.10 O experimento de Rutherford com partículas alfa.

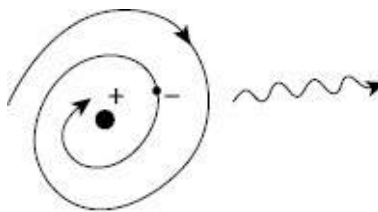



FIGURA 5.11 Instabilidade do modelo atômico de Rutherford.

Por que, no entanto, os elétrons negativos, atraídos pelo núcleo positivo, simplesmente não caíam nesse núcleo? Presumivelmente, pelo mesmo motivo que os planetas não se espatifam contra o Sol. Eles *orbitam* o Sol. Rutherford concluiu que os elétrons orbitavam o pequeno, massivo e positivo núcleo.

Havia um problema com o modelo planetário de Rutherford: instabilidade. Como o elétron tem carga, deveria emitir radiação à medida que percorre sua órbita. Cálculos mostraram que um elétron devia perder sua energia na forma de luz e cair em espiral, colidindo com o núcleo em menos de um milionésimo de segundo.

A maior parte da comunidade física considerava a instabilidade do modelo planetário um problema mais sério do que a incapacidade do modelo do pudim de passas para explicar os raros desvios de ângulo grande das partículas alfa de Rutherford. Mas Rutherford, um sujeito extremamente confiante, *sabia* que o seu modelo planetário estava basicamente certo.

QUANDO O JOVEM PÓS-DOC Bohr chegou a Manchester, Rutherford o encarregou da tarefa de explicar como o átomo planetário podia ser estável. A permanência de Bohr em Manchester durou apenas seis meses, supostamente porque seu dinheiro acabou. Mas a ansiedade de retornar à Dinamarca para se casar com a linda Margrethe provavelmente reduziu sua estada. Enquanto lecionava na Universidade de Copenhague, em 1913, Bohr continuou a trabalhar no problema da estabilidade.

Como ele chegou à sua ideia bem-sucedida não está claro. Mas, enquanto outros físicos tentavam entender como o quantum de energia e a constante de Planck, *h*, brotavam a partir das leis clássicas da física, Bohr assumiu uma atitude de "tudo bem com *h*!". Simplesmente aceitou a quantização como fundamental. Afinal, dera certo com Planck e dera certo com Einstein.

Bohr escreveu uma fórmula muito simples que dizia que "o momento angular", o movimento rotacional de um objeto, só podia existir em unidades quânticas. Assim sendo, só certas órbitas de elétrons eram permitidas. E, mais importante, escreveu suas fórmulas de modo a haver uma menor órbita possível. Por decreto, a fórmula de Bohr "proibia" um elétron de despencar sobre o núcleo. Se sua fórmula *ad hoc* estivesse correta, o átomo planetário seria estável.

Sem mais evidências, a ideia quântica de Bohr seria rejeitada como despropositada. Mas com sua fórmula Bohr pôde calcular prontamente todas as energias permitidas para um único elétron orbitando um núcleo, ou seja, para o átomo de hidrogênio. A partir dessas energias ele pôde calcular as frequências de luz particulares, ou cores, que seriam emitidas de átomos de hidrogênio eletricamente excitados numa "descarga", algo como um luminoso de neon, só que com hidrogênio em vez de neon.

Essas frequências haviam sido cuidadosamente estudadas durante anos, embora Bohr inicialmente não estivesse ciente desse trabalho. Por que apenas certas frequências eram emitidas era um completo mistério. O espectro de frequências, exclusivo de cada elemento, apresentava um belo conjunto de cores. Mas eram elas mais significativas que os padrões particulares das asas de uma borboleta? Agora, porém, a regra quântica de Bohr previa as frequências para o hidrogênio com impressionante exatidão – com precisão de partes em 10 mil. Embora nessa época a teoria de Bohr sustentasse que a luz era emitida por átomos em *quanta* de energia, ele, junto com essencialmente todos os outros físicos, ainda rejeitava o fóton compacto de Einstein.

Alguns físicos desprezaram a teoria de Bohr considerando-a "malabarismo com números". Einstein, porém, a chamou de "uma das maiores descobertas". E outros logo vieram a concordar. A ideia básica de Bohr foi logo aplicada amplamente em física e química. Ninguém entendia *por que* funcionava. Mas funcionava. E para Bohr era isso o que importava. A atitude pragmática de Bohr em relação ao quantum – "tudo bem com *h*!" – trouxe-lhe rápido sucesso.

Compare o triunfo inicial de Bohr e suas ideias quânticas com a longa permanência como um "homem isolado" de Einstein, com sua crença no fóton, quase universalmente rejeitado. Perceba, em capítulos posteriores, como as experiências iniciais desses dois homens são refletidas em seu debate amigável e vitalício sobre mecânica quântica.

O príncipe

Louis de Broglie era o *príncipe* Louis de Broglie. Sua família aristocrática planejara uma carreira no serviço diplomático francês para ele, e o jovem príncipe Louis estudou história na Sorbonne. Porém, depois de se graduar em arte, ele passou para física teórica. Antes de poder fazer muita coisa em física, a Primeira Guerra Mundial irrompeu e De Broglie serviu o exército francês num posto telegráfico na Torre Eiffel.

Finda a guerra, De Broglie começou a trabalhar no seu doutorado em física, atraído, diz ele, "pelo estranho conceito do quantum". Depois de três anos de estudos, leu o trabalho recente do físico americano Arthur Compton. Uma ideia estalou na sua cabeça, levando a uma breve tese de doutorado e mais tarde a um prêmio Nobel.

Para sua surpresa, Compton havia descoberto em 1923, quase duas décadas depois que Einstein propôs o fóton, que quando a luz ejetava elétrons sua frequência se modificava. Esse não é um comportamento de onda. Quando uma onda é refletida num objeto estacionário, cada crista incidente produz outra crista de onda. A frequência da onda, portanto, não muda com a reflexão. Por outro lado, se Compton admitisse que a luz era um fluxo de partículas, *cada uma com a energia de um fóton de Einstein*, obteria um encaixe perfeito com seus dados.

O "efeito Compton" conseguiu a proeza! Os físicos agora aceitavam os fótons. Seguramente, em certos experimentos a luz exibia propriedades de onda espalhada, e em outros, propriedades de partículas compactas. Contanto que se soubesse em que condições cada propriedade seria vista, a ideia do fóton parecia menos problemática do que achar alguma outra explicação para o efeito Compton. Einstein, porém, ainda um "homem isolado", insistia que um mistério se mantinha, e disse certa vez: "Todo Tom, Dick e Harry acha que sabe o que é o fóton, mas estão enganados."

FIGURA 5.12 Louis de Broglie. Cortesia Instituto Americano de Física.

O ESTUDANTE DE pós-graduação De Broglie compartilhava o sentimento de Einstein de que havia um significado profundo para a dualidade da luz, sendo *ou* uma onda espalhada *ou* um fluxo de partículas compactas. Ele se perguntava se poderia haver uma simetria na natureza. Se a luz era ou onda ou partícula, talvez a matéria também fosse ou partícula ou onda. Ele escreveu uma expressão simples para o comprimento de onda de uma partícula de matéria. Essa fórmula para o “comprimento de onda de De Broglie” de uma partícula é algo que qualquer aluno principiante de mecânica quântica rapidamente aprende.

	Onda	Partícula
Luz	✓	✓
Matéria	?	✓

FIGURA 5.13 A ideia de simetria de De Broglie.

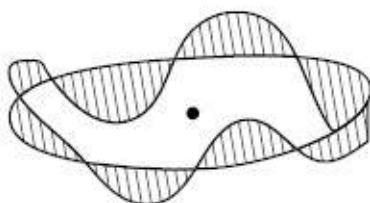



FIGURA 5.14 Comprimentos de onda em torno da órbita de um elétron.

O primeiro teste dessa fórmula veio de um quebra-cabeça que estimulou a ideia de onda de De Broglie: se um elétron num átomo de hidrogênio fosse uma partícula compacta, como poderia “saber” o tamanho da órbita em que deveria se mover para existir apenas nas órbitas permitidas pela agora já famosa fórmula de Bohr?

Os comprimentos de uma corda de violino requeridos para produzir certo tom são determinados pelo número de meios comprimentos de onda da vibração que se encaixam ao longo do comprimento da corda. Da mesma maneira, se o elétron fosse uma onda, as órbitas permitidas poderiam ser determinadas pelo número de comprimentos de onda do elétron que se encaixam em torno da circunferência da órbita. Aplicando essa ideia, De Broglie foi capaz de *deduzir* a regra quântica anteriormente *ad hoc* de Bohr. (No violino, é o material da corda que vibra. No caso da “onda” do elétron, o que vibra era na época um mistério. E ainda é.)

Não está claro o quanto De Broglie levou essa conjectura a sério. Com certeza não a reconheceu como uma visão de mundo revolucionária. Nas suas próprias palavras:

> [A]quele que apresenta as ideias fundamentais de uma nova doutrina frequentemente falha em perceber de início todas as consequências; guiado por intuições pessoais, compelido pela força interna de analogias matemáticas, ele é transportado, quase a despeito de si mesmo, para um caminho cujo destino final ele próprio ignora.

De Broglie levou sua especulação a seu orientador de tese, Paul Langevin, famoso por seu trabalho com magnetismo. Langevin não se impressionou. Observou que, ao deduzir a fórmula de Bohr, De Broglie meramente substituíra uma premissa *ad hoc* por outra. E a premissa de De Broglie, de que elétrons podiam ser ondas, parecia ridícula.

Fosse De Broglie um aluno de pós-graduação comum, Langevin poderia ter sumariamente jogado sua ideia fora. Mas ele era o *príncipe* Louis de Broglie. A aristocracia era significativa, mesmo na república francesa. Então, sem dúvida para se garantir, Langevin pediu um comentário sobre a ideia de De Broglie ao mais eminente físico do mundo. Einstein replicou que aquele rapaz tinha “erguido uma ponta do véu que oculta o Velho”.

NESSE MEIO-TEMPO, ocorreu um pequeno acidente nos laboratórios da companhia telefônica de Nova York. Clinton Davisson fazia experimentos com a dispersão de elétrons em superfícies metálicas. Embora os interesses de Davisson fossem largamente científicos, a companhia telefônica estava desenvolvendo amplificadores a válvula (tubo de vácuo) para transmissões telefônicas, e para isso o comportamento dos elétrons golpeando metal era importante.

Os elétrons geralmente eram ejetados numa superfície metálica áspera em todas as direções. Mas, após o acidente, no qual um vazamento permitiu entrada de ar no sistema a vácuo, oxidando uma superfície de níquel, Davisson aqueceu o metal para expulsar o oxigênio. O níquel cristalizou, formando essencialmente um arranjo de fendas. Os elétrons agora eram ejetados apenas em algumas poucas direções bem definidas. Era um padrão de interferência que demonstrava a natureza ondulatória do elétron. A descoberta confirmava a especulação de De Broglie de que objetos materiais também podiam ser ondas.

COMEÇAMOS ESTE CAPÍTULO com o primeiro indício do quantum, em 1900. Foi um indício largamente ignorado. Encerramos o capítulo com os físicos em 1923 finalmente forçados a aceitar a dualidade onda-partícula. Um fóton, um elétron, um átomo, uma molécula, em princípio qualquer objeto pode ser ou compacto ou largamente espalhado. Pode-se demonstrar que algo é ou maior que uma bisnaga de pão ou menor que um átomo. Pode-se escolher qual dessas duas características contraditórias demonstrar. A realidade física de um objeto depende de como você *escolhe* olhar para ele.

A física encontrou a consciência mas não se deu conta disso. A percepção desse contato veio alguns anos mais tarde, depois que Erwin Schrödinger descobriu a nova lei universal do movimento. Essa descoberta é o tema do nosso próximo capítulo.

6. A equação de Schrödinger
A nova lei universal do movimento

> Se ainda vamos ter de aturar esses malditos saltos quânticos, lamento ter tido algum dia algo a ver com a teoria quântica.
>
> ERWIN SCHRÖDINGER

NO COMEÇO DA DÉCADA de 1920 os físicos haviam aceitado o fato de que os elétrons, e presumivelmente outras matérias, bem como a luz, podiam ser exibidos *ou* como bocados compactos *ou* como ondas espalhadas. Dependia do experimento que se escolhia fazer.

Desde a explicação do efeito fotoelétrico dada por Einstein em 1905 envolvendo o fóton, os fatos experimentais indiscutíveis estavam bem ali diante dos físicos. Mas as implicações desses fatos foram largamente ignoradas. Em 1909 Einstein enfatizou que o quantum de luz se apresentava como um problema sério. Mas, como "um homem isolado", era praticamente o único a levar o quantum de luz a sério. Em 1913, Bohr falou da luz sendo emitida em saltos quânticos, mas não aceitou o fóton compacto. Em 1915 Millikan havia chamado de "temerária" a proposta do fóton de Einstein. Entretanto, com o experimento de Compton em 1923, desviando fótons individuais com elétrons, os físicos rapidamente aceitaram o fóton. Contudo, ignoraram a persistente preocupação de Einstein. Por quê? Sem dúvida esperavam que uma teoria fundamental, ainda por vir, resolvesse o problemático paradoxo da "dualidade onda-partícula". A teoria fundamental veio logo, mas não trouxe uma solução – bem ao contrário.

O reconhecimento de que o paradoxo é um problema sério veio três anos depois, em 1926, com a equação de Schrödinger. Erwin Schrödinger não estava procurando resolver o paradoxo onda-partícula. Ele via as ondas de matéria de

De Broglie como uma maneira de se livrar dos “malditos saltos quânticos” de Bohr. Ele explicaria as ondas de matéria.

ERWIN SCHRÖDINGER, filho único de uma próspera família vienense, foi um aluno excepcional. Quando adolescente interessou-se por teatro e arte. Rebelando-se contra a sociedade burguesa da Viena do fim do século XIX, Schrödinger rejeitava a moral vitoriana de sua criação. Ao longo de toda sua vida canalizou muita energia em intensos romances, sem levar em conta seu casamento vitalício.

FIGURA 6.1 Erwin Schrödinger. Cortesia Instituto Americano de Física.

Depois de servir na Primeira Guerra Mundial como tenente do exército austríaco na frente italiana, Schrödinger começou a lecionar na Universidade de

Viena. Mais ou menos nessa época abraçou a doutrina mística indiana do vedanta, mas parece ter mantido essa tendência filosófica separada da sua física. Em 1927, logo após seu trabalho espetacular em mecânica quântica, foi convidado a assumir um posto na Universidade de Berlim como sucessor de Planck. Com a ascensão de Hitler ao poder em 1933, Schrödinger, embora não fosse judeu, deixou a Alemanha. Após visitas à Inglaterra e aos Estados Unidos, retornou incauto à sua Áustria natal para aceitar uma posição na Universidade de Graz. Com a anexação da Áustria por Hitler, ficou em apuros. Ao deixar a Alemanha estabelecera sua oposição ao nazismo. Fugindo através da Itália, passou o resto da sua carreira na Escola de Física Teórica de Dublin, na Irlanda.

Na meia-idade os pensamentos de Schrödinger passaram a incluir questões sobre as implicações da mecânica quântica *além* da física. Escreveu dois livros pequenos, mas extremamente influentes. Em *O que é vida?* sugeria razões de mecânica quântica para a fonte de herança genética ser um "cristal aperiódico". Francis Crick, codescobridor da estrutura do DNA, credita sua inspiração ao livro de Schrödinger. O primeiro capítulo do outro livro de Schrödinger, *Mind and Matter*, intitula-se "A base física da consciência".

Uma equação de onda

Apesar dos sucessos iniciais da teoria quântica, com base na regra quântica de Bohr, Schrödinger rejeitava uma física em que os elétrons se moviam apenas em "órbitas permitidas" e então, sem causa nenhuma, abruptamente saltavam de uma órbita para outra. Ele não tinha papas na língua:

> Seguramente você deve entender, Bohr, que toda a ideia de saltos quânticos necessariamente conduz a um absurdo. Alega-se que o elétron num estado estacionário de um átomo primeiro gira periodicamente em algum tipo de órbita sem emitir radiação. Não há explicação para que ele não irradie; segundo a teoria de Maxwell, ele deve irradiar. Então o elétron salta de uma órbita para outra e, com esse salto, emite radiação. Essa transição ocorre de forma gradual ou súbita? … E que leis determinam seu movimento num salto? Bem, a ideia toda de saltos quânticos deve ser simplesmente absurda.

Schrödinger credita a "comentários breves mas infinitamente perspicazes" de Einstein o fato de ter tido sua atenção chamada para a especulação de De Broglie de que objetos materiais podiam exibir uma natureza ondulatória. A ideia atraía Schrödinger. Ondas podiam evoluir suavemente de um estado para outro. Elétrons como ondas não precisariam orbitar sem emitir radiação. Ele poderia se livrar dos "malditos saltos quânticos" de Bohr.

Perfeitamente disposto a emendar as leis de Newton para explicar o comportamento quântico, Schrödinger não obstante queria uma descrição do mundo em que elétrons e átomos se comportassem de forma *razoável*. Ele buscaria uma equação que governasse ondas de matéria. Seria uma nova física, um palpite que precisaria ser testado. Schrödinger buscaria a *nova* equação universal do movimento.

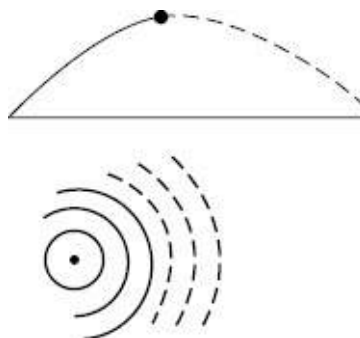



FIGURA 6.2 A trajetória de uma pedra e as ondas de água se espalhando.

Uma equação *universal* teria de funcionar também para objetos grandes, além de pequenos. A partir da posição e do movimento de uma pedra lançada num dado momento, a lei de Newton prediz a posição e o movimento futuro da pedra. Da mesma maneira, da forma inicial de uma onda, uma equação de onda prediz a forma da onda em qualquer instante posterior. Ela descreve como as ondulações se espalham a partir do ponto onde uma pedra atinge a água ou como as ondas se propagam numa corda esticada.

Havia um problema: a equação de onda que funciona para ondas de água, luz e som não funciona para ondas de matéria. Ondas de luz e som se movem na velocidade única determinada pelo meio no qual se propagam. O som, por exemplo, move-se a 330 metros por segundo no ar. A equação de onda que Schrödinger buscava teria de permitir que ondas de matéria se movessem em *qualquer* velocidade porque os elétrons, os átomos – e bolas de beisebol – se movem em qualquer velocidade.

A grande sacada veio durante umas férias na montanha com uma namorada em 1925. Sua esposa ficou em casa. Para ajudar a concentrar-se, Schrödinger levou consigo duas pérolas, para evitar ruído nos ouvidos. Exatamente que tipo de ruído ele queria evitar não está claro. Tampouco conhecemos a identidade da namorada, nem se ela era uma inspiração ou distração. Schrödinger mantinha diários discretamente codificados, mas o desse exato período sumiu.

Em quatro artigos publicados nos seis meses seguintes, Schrödinger apresentou a base da moderna mecânica quântica com uma equação que descrevia ondas de matéria. O trabalho foi imediatamente reconhecido como um

triunfo. Einstein disse que ele brotou de “pura genialidade”. Planck o chamou de “marco de uma época”. O próprio Schrödinger ficou encantado em pensar que havia se livrado dos saltos quânticos. Ele escreveu:

> Mal é necessário ressaltar o quanto mais gratificante seria conceber uma transição quântica como uma mudança de energia de um modo vibracional para outro do que encará-la como um salto de elétrons. A variação de modos vibracionais pode ser tratada como um processo contínuo no espaço e no tempo, e presente enquanto persiste o processo de emissão.

(A equação de Schrödinger é na verdade uma aproximação não relativista. Quer dizer, vale apenas quando as velocidades não são próximas da velocidade da luz. As questões conceituais de que tratamos ainda perduram no caso mais geral. É mais simples, mais claro e também costumeiro tratar do enigma quântico em termos da equação de Schrödinger. E, embora os fótons se movam na velocidade da luz, essencialmente tudo o que dissermos se aplica a eles.)

Os eventos foram mais complicados que a historinha que acabamos de contar, com um pouco mais de confrontos. Quase simultaneamente com a descoberta de Schrödinger, um jovem pós-doc de Bohr, Werner Heisenberg (de quem ouviremos mais posteriormente) apresentou sua própria versão da mecânica quântica. Era um método matemático abstrato para obter resultados numéricos. Negava qualquer descrição pictórica do que se passava. Schrödinger criticou a abordagem de Heisenberg: “Senti desânimo, se não aversão, diante do que me pareceu basicamente um método difícil de álgebra transcendental, que desafiava qualquer visualização.” Heisenberg tampouco ficou impressionado com a imagem de onda de Schrödinger. Numa carta a um colega: “Quanto mais pondero sobre a parte física da teoria de Schrödinger, mais repulsiva ela me parece.”

Por algum tempo pareceu que duas teorias intrinsecamente diferentes explicavam os mesmos fenômenos físicos, uma possibilidade inquietante acerca da qual os filósofos haviam especulado por muito tempo. Mas, em alguns meses, Schrödinger provou que a teoria de Heisenberg era logicamente idêntica à sua, apenas com uma representação matemática distinta. A versão de Schrödinger, mais tratável matematicamente, geralmente é a usada hoje.

A função de onda

Heisenberg tinha, porém, um ponto digno de nota a respeito do aspecto físico da teoria de Schrödinger. O que é que está ondulando na onda de matéria de Schrödinger? A representação matemática da onda é chamada de "função de onda". Num certo sentido, a função de onda de um objeto é o próprio objeto. Na teoria quântica padrão não existe átomo além da função de onda do átomo. Mas o que é, exatamente, a função de onda de Schrödinger *fisicamente*? A princípio, Schrödinger não sabia, e quando especulou, enganou-se. Por enquanto, vamos simplesmente seguir adiante e observar algumas funções de onda que a equação nos diz que podem existir. Foi o que Schrödinger fez.

VAMOS CONSIDERAR PRIMEIRO a função de onda de um objeto pequeno simples movendo-se ao longo de uma linha reta. Pode ser um elétron ou átomo, por exemplo. Para sermos genéricos, geralmente nos referimos a um "objeto", mas às vezes revertemos para "átomo". Mais adiante discutiremos funções de onda para coisas maiores – uma molécula, uma bola de beisebol, um gato, até mesmo a função de onda de um amigo. Os cosmólogos contemplam a função de onda do Universo, e nós também o faremos.

Alguns anos antes das férias inspiradoras de Schrödinger, Compton mostrou que fótons disparavam elétrons como se elétrons e fótons fossem semelhantes a minúsculas e compactas bolas de bilhar. Por outro lado, para mostrar interferência, todo e cada fóton ou elétron tinha de ser uma onda espalhada proveniente de duas trajetórias. Como é que um único objeto pode ser *tanto* compacto *quanto* espalhado? Uma onda pode ser *ou* compacta *ou* espalhada. Mas não compacta e espalhada ao mesmo tempo. Como era na verdade um átomo, um elétron ou um fóton? Seria o átomo um objeto compacto ou um espalhado? Ainda havia um problema.

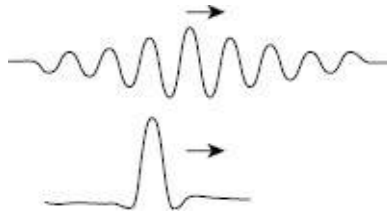



FIGURA 6.3 Função de onda como uma série de cristas ou uma crista única.

Mas uma coisa funcionava bastante bem: para coisas grandes, objetos muito maiores que átomos, a equação de Schrödinger essencialmente *se torna* a equação universal do movimento de Newton. A equação de Schrödinger governa portanto não só o comportamento de elétrons e átomos, mas também o comportamento de tudo o que é feito de átomos – moléculas, bolas de beisebol e planetas. A equação de Schrödinger nos diz qual será a função de onda numa dada situação e como ela se modificará com o tempo. Ela é a *nova* lei universal do movimento. A equação de Newton é apenas a aproximação excelente para coisas grandes.

Ondulatoriedade

A equação de Schrödinger diz que um objeto em movimento é um pacote de ondas em movimento. Porém, mais uma vez, o que é que está ondulando? Pense nestas analogias – Schrödinger sem dúvida pensou:

Num ponto tempestuoso do oceano, as ondas são grandes. Vamos dizer que essa região tem "ondulatoriedade" grande. O ressoar de um tambor, chegando a você de um tambor distante, é onde a ondulatoriedade da pressão do ar é grande; é onde *está* o som. A mancha luminosa onde a luz do sol atinge a parede, a região de grande ondulatoriedade do campo elétrico, é onde a luz *está*. Nesses casos, a ondulatoriedade nos conta onde algo *está*. Parece razoável transportar essa noção para o caso quântico.

A ondulatoriedade de um pacote de ondas quânticas é grande onde a amplitude das ondas é grande, onde as cristas são altas e os vales profundos. A ondulatoriedade pode ser fácil de desenhar se tivermos a função de onda. Indicaremos a ondulatoriedade por meio de sombreado. Quanto mais sombreado, maior a ondulatoriedade. (O termo matemático para ondulatoriedade é "quadrado absoluto da função de onda", e há um procedimento matemático para obtê-la a partir da função de onda. Mencionamos o termo apenas porque você poderá vê-lo em algum outro lugar. "Ondulatoriedade" é mais descritivo.)

FIGURA 6.4 Uma função de onda e sua ondulatoriedade.

QUANDO CONSIDERAMOS um átomo simplesmente como um objeto que se move em uma direção, ignoramos sua estrutura interna. Existem, é claro, funções de

onda de elétrons *dentro* do átomo. Nos primeiros tempos, Schrödinger calculou a função de onda de um único elétron dentro do átomo de hidrogênio, repetindo os resultados de Bohr para níveis de energia e o espectro do hidrogênio observado experimentalmente. Como foi capaz de fazer isso sem precisar das premissas arbitrárias de Bohr, Schrödinger teve certeza de que estava certo. Ele pensou que tinha se livrado dos saltos quânticos. Mas não foi bem assim, como veremos.

Na figura 6.5 esboçamos a ondulatoriedade dos três estados energéticos mais baixos do elétron de hidrogênio como seções transversais da ondulatoriedade tridimensional do elétron. Você pode visualizar a ondulatoriedade como chumaços de névoa. A névoa é mais densa onde a ondulatoriedade é maior. O formato do chumaço de névoa é, num certo sentido, o formato do átomo. Imagens calculadas como essas fornecem aos químicos a percepção de como os átomos e moléculas se ligam entre si.

FIGURA 6.5 A ondulatoriedade dos três estados mais baixos de um átomo de hidrogênio.

Poucos de nós pensavam que a ondulatoriedade de elétrons *dentro* de átomos fosse algum dia ser exibida *diretamente*, da maneira que um padrão de interferência mostra a ondulatoriedade largamente espalhada de elétrons livres ou átomos. Os padrões da figura 6.5 são calculados a partir da equação de Schrödinger e são então confirmados indiretamente pelos comportamentos que pressupõem. Em 2009, físicos ucranianos, usando uma velha técnica de imagens, a “microscopia de emissão de campo”, arrancaram elétrons de átomos de carbono isolados com um grande campo elétrico. Observando numa tela de detecção onde pousavam os elétrons, puderam rastrear a posição *dentro do átomo* do qual os elétrons emergiam. Assim confirmaram diretamente os familiares padrões de ondulatoriedade dos livros-texto.

Por acaso sugerimos que a ondulatoriedade nos conta onde o objeto realmente está? Não é bem assim.

A interpretação inicial (errada) da ondulatoriedade feita por Schrödinger

Schrödinger especulou que a ondulatoriedade de um objeto era o próprio objeto espalhado. Onde, por exemplo, a névoa do elétron é mais densa, o material do elétron seria mais concentrado. O elétron estaria portanto espalhado em toda a extensão da sua ondulatoriedade. A ondulatoriedade de um dos estados do elétron de hidrogênio retratada acima poderia então se transformar suavemente em outro estado sem o salto quântico que Schrödinger detestava.

Essa interpretação aparentemente razoável da ondulatoriedade está errada. Eis por quê: embora a ondulatoriedade de um objeto possa estar espalhada sobre uma região extremamente ampla, quando se olha um ponto particular, encontra-se imediatamente ou um objeto *inteiro* ali ou objeto *nenhum* naquele ponto.

Por exemplo, uma partícula alfa emitida de um núcleo poderia ter uma ondulatoriedade estendendo-se por quilômetros. Mas, assim que se ouve o clique de um contador Geiger, pode-se encontrar uma partícula alfa inteira exatamente dentro do contador. Ou consideremos a ondulatoriedade de um único elétron dirigido a uma tela de cintilação, no experimento de interferência que confirmou a ideia de onda de De Broglie. Sua ondulatoriedade seria em diversas porções, separadas por centímetros. Mas um instante depois se vê um cintilar num *ponto único* da tela, onde o elétron a atinge. O elétron inteiro pode então ser encontrado ali. A ondulatoriedade anteriormente espalhada do elétron fica subitamente concentrada naquele único ponto. Se, por outro lado, o elétron fosse detectado enquanto em trânsito para a tela, seria encontrado concentrado em algum ponto único em uma das diversas porções de sua ondulatoriedade.

Se um objeto físico real fosse espalhado sobre a extensão de sua ondulatoriedade, como Schrödinger inicialmente pensou, suas partes remotas teriam de coalescer instantaneamente para o lugar onde o objeto inteiro se

encontrava, a fim de se ajustar aos fatos observados. A matéria física teria de se mover com velocidade maior que a da luz. Isso é impossível.

Ao tentar se livrar dos “malditos saltos quânticos”, Schrödinger fracassou. Mais adiante vamos encontrá-lo objetando a algo muito mais ultrajante que elétrons saltando de órbita.

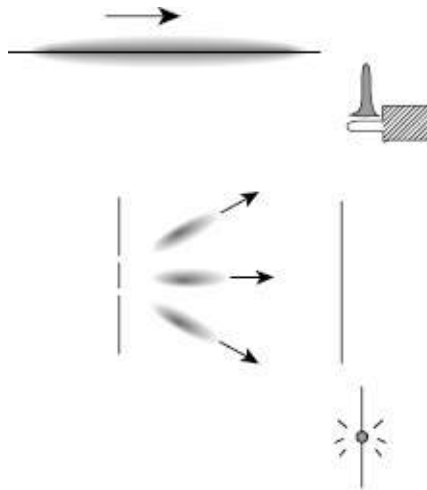



FIGURA 6.6 *No alto:* Ondulatoriedade de uma partícula alfa antes e depois de ser detectada por um contador Geiger. *Embaixo:* Ondulatoriedade de um único elétron antes e depois de ser detectado numa tela.

A interpretação aceita de ondulatoriedade

A partir da posição e do movimento de objetos num dado momento, as leis do movimento de Newton dão sua posição e o movimento para todos os momentos futuros e passados. A partir da função de onda num dado momento, a equação de Schrödinger dá a função de onda para todo o tempo futuro e passado. Nesse sentido, a *teoria* quântica é tão determinista quanto a física clássica. A *mecânica* quântica, a teoria mais as observações experimentais, tem uma aleatoriedade intrínseca. Essa aleatoriedade surge com a "observação", algo inexplicado pela teoria.

O que descrevemos nas próximas páginas pode ser confuso. É confuso por ser difícil de *acreditar*. A interpretação aceita da ondulatoriedade desafia qualquer visão de senso comum da realidade física. Ela nos apresenta o enigma quântico.

A ondulatoriedade numa região é a probabilidade de *encontrar* o objeto num lugar determinado. Devemos ter cuidado: a ondulatoriedade *não* é a probabilidade de o objeto *estar* num lugar específico. Há uma diferença crucial! O objeto não estava lá antes de você tê-lo encontrado lá. Você poderia ter escolhido um experimento de interferência, demonstrando que ele estava espalhado por uma vasta região. Você sabe que poderia ter feito um experimento de interferência porque foi o que de fato fez com outros objetos preparados exatamente da mesma maneira. Você poderia ter feito essa escolha também neste caso. De algum modo, o fato de você ter olhado é que *causou* que ele estivesse num lugar específico. Em nossa visão padronizada da mecânica quântica – a interpretação de Copenhague (abordada no capítulo 10) –, "observações" não só perturbam o que deve ser medido, observações na verdade *produzem* o resultado medido. Mais adiante falaremos sobre o que poderia ser considerado uma "observação".

Ondulatoriedade é probabilidade, mas devemos contrastar ondulatoriedade, ou probabilidade quântica, com probabilidade clássica, algo similar mas intrinsecamente diferente. Comecemos com um exemplo de probabilidade clássica.

NUMA QUERMESSE, um sujeito que fala rápido, com mãos ainda mais rápidas, faz a brincadeira das cascas de noz. Ele coloca um feijão debaixo de uma de duas cascas viradas para baixo. Depois de ele mexê-las e embaralhá-las rapidamente, seus olhos deixam de acompanhar qual das cascas contém o feijão. Há uma probabilidade igual de o feijão estar em um dos dois lugares. Associamos uma probabilidade de um meio para cada casca de noz, o que significa que metade das vezes que olharmos encontraremos o feijão sob, digamos, a casca da direita. A soma das probabilidades para as duas cascas é 1 (½ + ½ = 1). Isso corresponde à certeza de que o feijão está debaixo de uma das duas cascas.

Após um pouco de falatório, enquanto recebe algumas apostas, o operador ergue, digamos, a casca da direita, e você vê o feijão. Instantaneamente, torna-se certeza que o feijão está debaixo da casca da direita e *não* está debaixo da casca da esquerda. A probabilidade de o feijão estar sob a casca da esquerda “colapsou” para zero e a de estar sob a casca da direita subiu para 1, uma certeza. Mesmo que a casca da esquerda fosse movida por toda a cidade antes de se levantar a casca da direita, o colapso da probabilidade ainda assim seria instantâneo. Grandes distâncias não afetam a rapidez com que a probabilidade pode mudar.

FIGURA 6.7

Jogos de azar tornam quase óbvio o que a ondulatoriedade quântica deve representar. (Óbvio pelo menos para aqueles de nós que anteriormente foram informados da resposta.) Na verdade, foi apenas alguns meses depois de Schrödinger anunciar sua equação que Max Born percebeu que a ondulatoriedade numa região era *probabilidade*, a probabilidade de o objeto *inteiro* ser encontrado naquela região. Esse postulado de Born relaciona o que realmente observamos, um objeto inteiro num lugar específico, com a expressão matemática da ondulatoriedade dada pela teoria quântica. Como a probabilidade no jogo de cascas de noz, quando descobrimos onde o objeto está, sua ondulatoriedade instantaneamente "colapsa" para 1 na região em que o encontramos, e para zero em todos os outros lugares.

Existe, porém, uma diferença crucial entre a probabilidade clássica ilustrada pelo jogo das cascas de noz e a probabilidade quântica representada pela ondulatoriedade. A probabilidade clássica é uma declaração de conhecimento da pessoa. No jogo de cascas de noz, você não saber absolutamente sob que casca o feijão está significa que para *você* a probabilidade de ele estar sob cada uma delas era ½. O operador do jogo provavelmente tinha um conhecimento melhor. Para *ele* a probabilidade era diferente.

A probabilidade *clássica* representa o conhecimento que uma pessoa tem de uma situação. Não nos conta toda a história. Presume-se a existência de algo

físico *além* desse conhecimento, algo a que essa probabilidade *se refere*. Existia, por exemplo, um feijão de verdade sob uma das cascas. Se alguém espiasse e visse o feijão sob a casca da esquerda, a probabilidade colapsaria para *certeza*, passaria a 1, para essa pessoa. Mas poderia continuar sendo ½ para cada casca para sua amiga que não espiou. A probabilidade clássica é subjetiva.

FIGURA 6.8

A PROBABILIDADE *quântica*, a ondulatoriedade, por outro lado, é misteriosamente objetiva; é a mesma para todo mundo. A função de onda é a história *toda*: a descrição quântica padrão não tem nenhum átomo além da função de onda do átomo. Conforme diz um importante texto de física quântica, o termo "a função de onda do átomo" é *sinônimo* de "o átomo".

Se alguém olhasse num ponto particular e acontecesse de ver o átomo ali, esse olhar "colapsaria" a função de onda espalhada daquele átomo para que ficasse inteiramente naquele ponto específico. Ou seja, o átomo estaria então naquele ponto para todo mundo. (Se olhasse e *não* encontrasse o átomo ali, ele não estaria ali para todo mundo.) Se alguém observasse o átomo num ponto específico, um segundo observador olhando um ponto diferente seguramente não encontraria o átomo nesse outro ponto. No entanto, a ondulatoriedade desse átomo existiria naquele ponto diferente imediatamente antes de o primeiro observador colapsá-lo. A teoria quântica insiste que isso é assim porque um experimento de inferência *poderia ter* estabelecido a ondulatoriedade desse

átomo como ali existente. (Isso é reconhecidamente confuso. A situação ficará mais clara quando descrevermos os experimentos que levam a essas conclusões. Mas o enigma permanecerá.)

Observar que um átomo está num lugar específico *cria* sua existência ali? Sim. Mas precisamos tomar cuidado aqui. Estamos tocando em algo controverso: “observação”. A visão padrão (ou interpretação de Copenhague, às vezes chamada visão “ortodoxa” da física) considera que uma observação tem lugar sempre que um objeto pequeno, microscópico, afeta um objeto grande, macroscópico. Se um átomo produzir um brilho em algum ponto de uma tela de cintilação, por exemplo, essa tela macroscópica, na interpretação de Copenhague, “colapsa” a função de onda largamente espalhada do átomo, levando-a a concentrar-se naquele ponto da tela.

Entretanto, exatamente antes de atingir a tela, o átomo era uma onda espalhada. Ao atingir a tela, de algum modo ele se tornou uma partícula concentrada num ponto específico. Pudemos olhar e encontrá-lo ali. Podemos portanto dizer que a tela “observou” o átomo. Esse é um bom caminho a seguir, pelo menos para todos os propósitos *práticos*. Contudo, vamos nos interessar por aquilo que ocorre *além* de meros propósitos práticos.

Temos falado sobre um átomo porque a teoria quântica foi desenvolvida para lidar com objetos microscópicos. Mas a teoria quântica é básica para toda a física, toda a ciência, e é aplicada a entidades grandes como o Universo, e íntimas como a mente, embora fazê-lo seja controverso.

Intrinsecamente probabilístico

Uma teoria em física prediz o que você verá num experimento, onde "experimento" é qualquer situação bem especificada. Para uma bola arremessada, por exemplo, ou um planeta, a física clássica nos diz a posição real da bola ou do planeta em qualquer momento, *mesmo que não estejam sendo observados*. Pode haver incerteza em tais previsões, que podem especificar uma gama de posições possíveis. Embora as previsões possam ser probabilísticas, presume-se que o objeto exista realmente num lugar específico. Em física clássica, probabilidade é a incerteza subjetiva do nosso conhecimento.

A mecânica quântica, por outro lado, é *intrinsecamente* probabilística. Probabilidade é tudo o que há. A física quântica não nos diz a probabilidade relativa a onde o objeto *está*, e sim a probabilidade de que, se você olhar, *observe* o objeto num lugar específico. O objeto não tem "posição real" antes de essa posição ser observada. Em mecânica quântica a posição de um objeto não é independente de sua observação nessa posição. O observado não pode ser separado do observador.

VAMOS DAR UMA olhada em duas abordagens relativas à probabilidade quântica.

Existe a abordagem "Está tudo bem!": ondulatoriedade é a probabilidade daquilo que você *observará*. Sim, ela depende de como você olha. Você pode olhar diretamente para um objeto e demonstrar que ele é uma coisa compacta num lugar específico. Ou pode fazer um experimento de interferência e demonstrar que ele era uma coisa espalhada. Em qualquer um dos casos, a mecânica quântica prevê o resultado correto para o experimento que você de fato fizer. Como predições corretas são tudo de que se necessita, para todos os propósitos práticos não existe problema. Nós defendemos essa atitude pragmática útil, a interpretação de Copenhague, no capítulo 10.

De outro lado, há a abordagem “Estou perplexo!”: a teoria só dá ondulatoriedade. Essa é uma *premissa* que vai *além* da equação de Schrödinger. É o postulado de Born que nos diz que a observação colapsa a ondulatoriedade espalhada para o lugar específico onde acontece de encontrarmos o objeto.

Será que a lei fundamental da natureza, a equação de Schrödinger, fornece apenas *probabilidade*? Einstein sentia que devia haver uma explicação determinista para uma posição particular na qual o objeto era encontrado: “Deus não joga dados.” (Bohr sugeriu que Einstein não dissesse a Deus como dirigir o Universo.)

A aleatoriedade *não* era o problema sério de Einstein com a mecânica quântica, apesar desse comentário teológico muito citado. O que perturbava Einstein, e Schrödinger, e mais especialistas nos dias de hoje, é a aparente negação da realidade física pela mecânica quântica. Ou, talvez a mesma coisa, que a *escolha* do observador quanto a como observar afete a situação física *anterior*. Segundo a teoria quântica, *não* havia um átomo real num lugar específico antes de olharmos, “colapsarmos a função de onda” e *encontrarmos* um átomo ali. Mas *existem* átomos reais, e coisas reais feitas de átomos. Não existem?

NO COMEÇO DOS anos 1920, antes da equação de Schrödinger, o fato de alguém poder considerar luz e matéria *tanto* como onda espalhada *quanto* como coleção de partículas compactas era um quebra-cabeça perturbador. No entanto, esperava-se que alguma teoria fundamental ainda por ser encontrada pudesse dar uma explicação razoável. No fim dos anos 1920, com a equação de Schrödinger, a teoria fundamental parecia estar à mão. Mas o quebra-cabeça era ainda mais perturbador.

7. O experimento da dupla fenda
O problema do observador

> [O experimento da dupla fenda] contém o único mistério. Não podemos fazer o mistério sumir "explicando" como funciona … Ao contar a você como funciona teremos lhe falado acerca das peculiaridades básicas de toda a mecânica quântica.
>
> RICHARD FEYNMAN

NESTE CAPÍTULO, buscamos rigor na apresentação do enigma quântico. No resto do livro, ponderaremos de modo mais relaxado sobre o que tudo isso pode significar.

O experimento da dupla fenda, a demonstração arquetípica dos fenômenos quânticos, revela o encontro da física com a consciência. Citando Feynman acima: "Não podemos fazer o mistério sumir…" Mas contaremos como funciona.

O experimento da dupla fenda é, em parte, um experimento de interferência. Descrevemos interferência para ondas luminosas no capítulo 4. A interferência foi demonstrada com fótons, elétrons, átomos e moléculas grandes, e está sendo tentada com coisas ainda maiores. Demonstrar a interferência com fótons é uma atividade fácil de sala de aula. As fendas podem ser dois traços riscados num filme opaco. Fazendo incidir um apontador laser através das fendas, pode-se exibir um claro padrão de interferência. A interferência com elétrons não é tão fácil, mas pode-se comprar um equipamento impressionante para demonstração em sala de aula por alguns milhares de dólares. Demonstrar interferência com átomos ou moléculas é mais complicado e muito mais caro. Mas a ideia é basicamente a mesma. Como elétrons ou átomos colidiriam com moléculas de ar, a interferência com objetos diferentes de fótons precisa ser exibida num

recipiente de onde o ar é retirado, mas não nos preocuparemos com tais “detalhes” técnicos.

Como o mistério quântico é o mesmo em todos os casos, e como falar não apresenta problemas de orçamento, vamos discorrer sobre átomos. Hoje podemos ver átomos individuais, até mesmo pegá-los e soltá-los um de cada vez. Vamos primeiro descrever brevemente a versão padrão do experimento da dupla fenda. Então seguiremos com uma versão completamente equivalente que contrasta muito bem com o jogo de cascas de noz do capítulo 6.

QUANDO DESCREVEMOS a interferência de ondas luminosas no capítulo 4, comentamos que, para obter um padrão de interferência bem definido, a luz deve ser de uma única cor. Isso significa luz de uma gama estreita de frequências e comprimentos de onda. O mesmo se aplica aos átomos. Os átomos devem ter essencialmente o mesmo comprimento de onda de De Broglie, o que simplesmente significa que devem vir na mesma velocidade.

NOSSAS FENDAS SÃO duas aberturas, conforme é mostrado na figura 7.1. Enviam-se os átomos a partir da esquerda. Passando pelas fendas, eles atingem uma tela à direita, que mostramos na figura 7.2. (Não nos incomodamos com átomos que deixem de passar pelas fendas.)

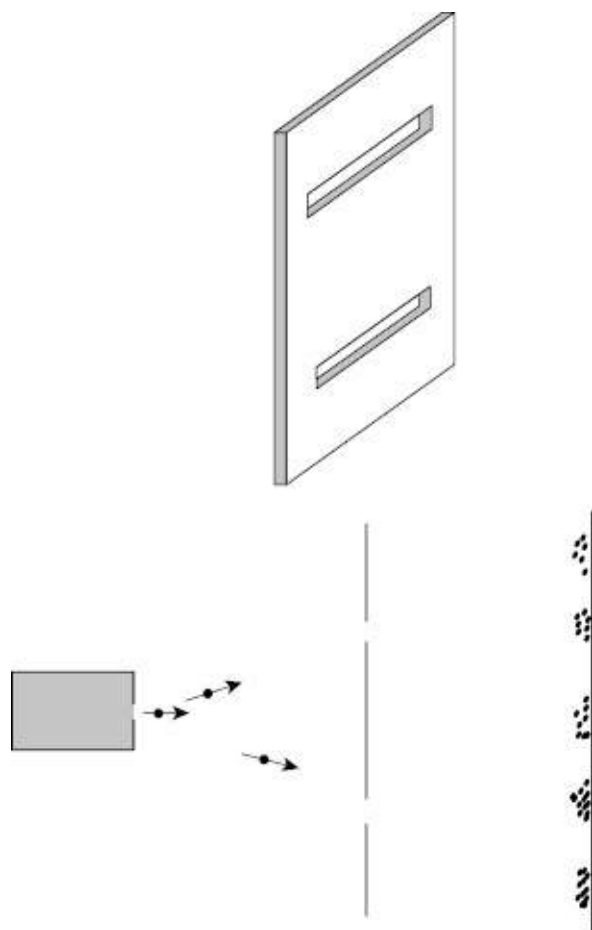



FIGURA 7.1 *No alto:* O diafragma de dupla fenda. *Embaixo:* Vista lateral de fonte de átomos, diafragma de dupla fenda e tela de detecção com átomos em padrão de interferência.

FIGURA 7.2 Padrão de interferência formado por átomos que passaram por duas fendas estreitas.

Registram-se os pontos da tela onde os átomos pousaram. Eles atingem apenas certas regiões. A distribuição dos átomos produz o padrão mostrado na figura 7.2. (É o mesmo padrão das ondas luminosas da figura 5.7.)

O padrão, um padrão de interferência, ocorre, como acontece com qualquer onda, porque a função de onda de cada átomo passa por ambas as fendas. Em algumas regiões da tela, cristas da fenda superior chegam junto com cristas da fenda inferior. Ondas de ambas as fendas então se somam para produzir regiões de grande comprimento de onda. Em outras partes, cristas de uma fenda chegam junto com vales da outra e se cancelam, produzindo regiões com ondulatoriedade zero. A ondulatoriedade numa região é a probabilidade de encontrar ali um átomo. Logo, você encontra regiões atingidas por muitos átomos e regiões atingidas por poucos átomos. Na interpretação "ortodoxa" de Copenhague do que está se passando, a função de onda de cada átomo colapsou no ponto particular atingido, onde foi "observado" pela tela macroscópica.

Como a função de onda de cada átomo seguiu uma regra que depende do espaçamento entre as fendas, *alguma coisa* de cada átomo *deve* ter passado

através de ambas as fendas. A teoria quântica não tem nenhum átomo além da função de onda do átomo. Consequentemente, cada átomo em si deve ter sido alguma coisa *espalhada* passando através de ambas as fendas bem separadas.

Entretanto, poderíamos *ter feito* esse experimento com apenas uma fenda aberta. A função de onda de cada átomo poderia então ter passado através de uma única fenda estreita. Continuamos encontrando átomos que atingem a tela. Não poderia haver, é claro, nenhuma interferência porque a função de onda de cada átomo passou por uma fenda apenas. Mas, como a função de onda de cada átomo passou por uma *única* fenda estreita, cada átomo é estabelecido como sendo uma coisa *compacta*, uma partícula. Os átomos caem na distribuição uniforme mostrada na figura 7.3.

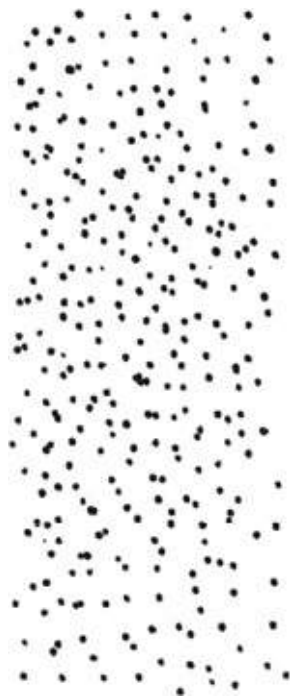



FIGURA 7.3 Distribuição de átomos passando através de uma única fenda estreita.

Pudemos assim escolher demonstrar, com ambas as fendas abertas, que os átomos são coisas espalhadas. Ou, com uma única fenda aberta, demonstrar o contrário, que os átomos são partículas compactas. Esse é, obviamente, o paradoxo onda-partícula discutido para as ondas de De Broglie no capítulo 5.

Simplesmente contamos a história para átomos em termos da teoria quântica atual.

Nossa versão com pares de caixas do experimento da dupla fenda

Eis aqui uma versão completamente equivalente do experimento da dupla fenda, na qual se pode escolher mostrar que um objeto, um átomo, por exemplo, estava *inteiramente* dentro de uma caixa só. Mas *poderíamos* ter escolhido mostrar que o mesmo átomo *não* estava inteiramente numa caixa só. Contando a história com átomos capturados em caixas, você pode decidir *a seu bel-prazer* qual situação contraditória deseja demonstrar. Essa maneira de contar a história mostra de modo mais impressionante o desafio quântico à nossa intuição de senso comum segundo a qual existe "lá fora" uma realidade física independente do observador. Vamos nos referir ao nosso par de caixas de novo – *e de novo* – em capítulos futuros. Portanto, nós a contamos cuidadosamente aqui.

ARISTÓTELES ENSINAVA que para descobrir as leis da natureza devia-se começar com os exemplos mais simples e a partir deles passar a generalizações mais amplas. Galileu aceitou essa injunção, mas advertiu que devemos nos basear apenas naquilo que é *experimentalmente* demonstrável, mesmo se os resultados violarem nossas intuições mais profundas. Considerando o comportamento idealizado de objetos isolados, a Lua, os planetas e maçãs, Newton formulou sua equação universal do movimento. O experimento da dupla fenda, a demonstração mais simples de fenômenos quânticos, segue esse caminho. Tratamos nossa versão de pares de caixas com átomos com o máximo cuidado. Posteriormente, vamos generalizá-la para gatos, a consciência e o cosmo.

NO JOGO DAS CASCAS de noz do capítulo 6, o feijão tinha igual probabilidade de estar debaixo de cada casca. Probabilidade não era a descrição completa da situação física. Decididamente havia também um feijão real debaixo de uma

casca ou de outra. A observação *não* mudava essa situação física. Colocaremos partes iguais da ondulatoriedade de um único átomo em cada uma das duas caixas, de modo que o átomo tenha igual probabilidade de estar em cada caixa. Mas, ao contrário do que acontece no jogo de cascas de noz, não existe nenhum “átomo real” numa caixa em particular. A função de onda dividida em ambas as caixas é a descrição *completa* da situação física. E aqui, ao contrário do que ocorre no jogo de cascas de noz, a observação muda *sim* a situação física.

Para mostrar o enigma quântico, *não* é necessário dizer como os nossos pares de caixas são preparados. Entretanto, uma vez que já falamos de funções de onda, descreveremos a preparação. Depois disso, porém, mostraremos o enigma quântico dizendo *apenas* o que você realmente *veria*. Descreveremos o experimento dos pares de caixas, sem mencionar a teoria quântica, ou funções de onda, sem mencionar nem mesmo ondas.

EIS COMO OS ÁTOMOS foram colocados nos pares de caixas. Qualquer onda pode ser refletida. Um espelho semitransparente reflete parte de uma onda e permite que o resto o atravesse. Um painel de vidro, por exemplo, permite que alguma luz passe e outro tanto seja refletido. No vidro, a função de onda de cada fóton individual se divide. Uma parte é refletida e outra transmitida. Podemos ter também um espelho semitransparente para átomos. Ele divide a função de onda de um átomo em dois pacotes de ondas, um pacote que o atravessa e outro que é refletido.

O arranjo de espelhos e caixas da figura 7.4 permite capturar as duas partes da função de onda de um átomo num par de caixas. Mandamos um átomo único numa velocidade conhecida e fechamos as portas das caixas quando ambos os pacotes de função de onda estiverem dentro delas. Depois disso, cada parte da função de onda é refletida de um lado a outro na sua caixa. Na figura 7.4 mostramos a função de onda e a ondulatoriedade em três momentos sucessivos.

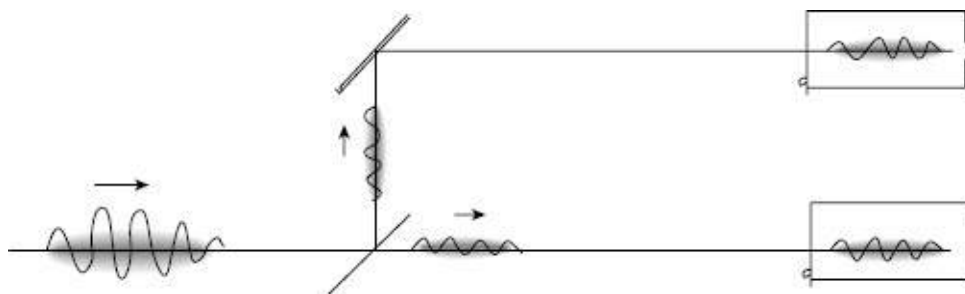



FIGURA 7.4 Disposição de espelho e par de caixas de modo a permitir a captura de uma função de onda num par de caixas. A função de onda de um átomo é mostrada em três instantes diferentes.

Sabemos que há um, e apenas um, átomo em cada par de caixas porque *observamos* um átomo e o enviamos para dentro de cada par de caixas. Nos dias de hoje, com as ferramentas adequadas, podemos ver e lidar com átomos e moléculas individuais. Com um microscópio de tunelamento com varredura, por exemplo, podemos pegar e soltar átomos individuais.

Reter um átomo numa caixa sem perturbar sua função de onda seria complicado, mas certamente é factível. Dividir a função de onda de um átomo em duas regiões bem separadas é algo que se consegue em todo experimento real de interferência com átomos. Capturar os átomos em caixas físicas na realidade não é necessário para nossa demonstração. Uma região definida do espaço bastaria. Gostamos de pensar em cada região definida por uma caixa porque se parece mais com o jogo das cascas de noz. Podemos então considerar que o átomo está ali, à espera de decidirmos o que fazer com ele, em vez de fazê-lo atravessar um diafragma de duas fendas a caminho de uma tela de detecção.

Daqui por diante, a descrição do nosso experimento de pares de caixas não mencionará funções de onda, nem mesmo ondas. Simplesmente diremos o que você de fato veria. Descrevemos observações *neutras em termos de teoria quântica*. Fazendo isso, enfatizamos que o enigma quântico surge *diretamente* de observações *experimentais*. A existência do enigma quântico *não* depende da *teoria* quântica!

O "experimento de interferência"

Você é apresentado a um grande número de pares de caixas. (Elas foram preparadas conforme foi descrito acima, mas, para a demonstração do enigma, você não precisa saber nada sobre a preparação.) Posicione um par de caixas na frente de uma tela na qual um átomo fique grudado após o impacto. Abra uma pequena fresta em cada caixa, mais ou menos ao mesmo tempo. Um átomo atinge a tela. Repita isso com muitos pares de caixas identicamente posicionadas. Você descobre que os átomos se agrupam em algumas regiões da tela, mas evitam outras regiões. O padrão é o mesmo que foi mostrado anteriormente na figura 7.2 para o par de fendas. Cada átomo seguiu uma regra que lhe permitia pousar em certas regiões e lhe proibia pousar em outras.

Agora repita o procedimento com um novo conjunto de pares de caixas. Desta vez deixe um espaçamento diferente entre as caixas de cada par. Você descobre que as regiões onde os átomos se agrupam estão *espaçadas* de forma diferente. Quanto maior o espaçamento entre as caixas de um par, menor o espaçamento entre as regiões onde os átomos pousam. Ilustramos isso na figura 7.5. Todo e cada átomo seguiu uma regra que *depende do espaçamento* do seu par de caixas. Cada átomo, portanto, tinha de “saber” o espaçamento do par.

FIGURA 7.5 Padrões de interferência formados por átomos que passaram por duas frestas estreitas com diferentes separações entre elas.

Está claro que o experimento que acabamos de descrever é um experimento de interferência, como o experimento da dupla fenda, e a partir de agora vamos chamá-lo de “experimento de interferência”. Mas *não usamos* nenhuma propriedade das ondas. Alguma coisa de cada átomo tinha de vir de cada caixa, porque o local onde os átomos pousavam dependia do espaçamento entre as caixas do par. Esse experimento de interferência estabelece que cada átomo era uma coisa difusa, espalhada em ambas as caixas do par. (Nada que é feito *fora* das caixas enquanto o átomo ainda está lá dentro tem nenhum efeito.)

O que explica que um átomo *inteiro* apareça na tela quando parte dele teve de vir de *cada* caixa do par? Não faria sentido dizer que uma *parte* de cada átomo *estava* em cada caixa? Nesse caso, parte do átomo emergiu de cada caixa do par, e então consolidou-se no ponto da tela onde foi encontrado. Essa ideia que soa razoável não funciona. Eis por quê:

O experimento "qual caixa?"

Em vez de fazer o experimento abrindo frestas nas caixas de um par *ao mesmo tempo*, escolha um experimento diferente: abra uma fresta numa das caixas e *depois* faça o mesmo na outra. Ao abrir uma das caixas, às vezes você descobre que um átomo *inteiro* atinge a tela. Se isso acontece, ao abrir a outra caixa do par, *não sai nada*. Se você abrir uma caixa e não aparecer nada na tela, então, com toda a certeza, um átomo aparecerá na tela quando você abrir a segunda caixa. Abrindo repetidamente uma caixa de cada vez num conjunto de pares, você determina em qual caixa está o átomo *inteiro*. Você demonstra que havia um átomo *inteiro* numa das caixas, e que a outra caixa do par *não continha nada*. Com átomos estando inteiramente numa única caixa, o espaçamento entre elas não seria relevante. De fato, você descobre uma distribuição uniforme de átomos atingindo a tela, como vimos anteriormente na figura 7.3 para o caso de ser aberta uma única fenda.

Há um meio mais direto de estabelecer que cada átomo estava *inteiramente* numa caixa única. Simplesmente *olhe* para ver qual caixa continha o átomo. Não importa como você olhe. Você pode, por exemplo, fazer incidir um feixe de luz apropriado dentro da caixa e ver uma cintilação do átomo. Cerca de metade das vezes você encontrará um átomo inteiro na caixa em cujo interior espiou; cerca de metade das vezes você achará a caixa vazia. Se não houver átomo na caixa espiada primeiro, ele sempre estará na outra. Se achar o átomo numa caixa, a outra do par estará *totalmente vazia*. Nenhuma observação, de nenhum tipo, acharia nada nessa caixa vazia. O experimento "qual caixa?" ou "olhar dentro da caixa" estabelece que cada átomo estava concentrado numa *única caixa* do par, que *não* estava espalhado em ambas as caixas.

MAS, ANTES DE olhar, você poderia ter feito um experimento de interferência estabelecendo que havia algo de cada átomo em *ambas* as caixas. Portanto, poderia ter escolhido provar que cada átomo estava *inteiramente* numa única

caixa ou provar que cada átomo *não* estava inteiramente numa única caixa. Você pode optar por provar qualquer uma dessas duas situações *contraditórias*.

A possibilidade de provar *qualquer um* dos dois resultados contraditórios é intrigante. Querendo explorar além, alguns indagaram: “E se você fizer *ambos* os experimentos com os mesmos átomos? E se abrir os pares de caixas ao mesmo tempo para obter um padrão de interferência, mas *também* olhar para ver de qual caixa cada átomo saiu?” Essa olhada é essencialmente um experimento “qual caixa?”. Absolutamente *qualquer coisa* que você fizer que lhe permita saber em qual caixa o átomo estava anula a capacidade do átomo de obedecer à regra que dá o padrão de interferência.

Buscando um furo, um lógico poderia comentar que o experimento de interferência se baseia em evidência *circunstancial*. Que utiliza um fato, o padrão de interferência, para estabelecer outro fato – que cada átomo veio das duas caixas. Isso é verdade em *qualquer* experimento de interferência. Não encontrando nenhuma outra explicação razoável, a física aceita universalmente que a interferência estabelece uma ondulatoriedade espalhada. Como no sistema legal americano, uma evidência circunstancial pode estabelecer uma conclusão além de qualquer dúvida razoável.

Uma teoria que conduz a uma contradição lógica é necessariamente incorreta. Será que a possibilidade de demonstrar qualquer uma de duas coisas contraditórias acerca dos átomos (e outros objetos) invalida a teoria quântica? Não. Você não demonstrou a contradição com *exatamente* as mesmas coisas. Você fez dois experimentos com átomos diferentes.

O enigma quântico

Eis aqui uma explicação logicamente *concebível* para a possibilidade de provar qualquer uma de duas coisas contraditórias: os pares de caixas para os quais você escolheu o experimento de interferência realmente *continham* objetos extensos espalhados pelas duas caixas, *não* inteiros numa caixa só. E os pares de caixas para os quais você escolheu o experimento “qual caixa?” realmente

continham objetos compactos inteiros numa caixa só. De que outra maneira isso poderia ser estabelecido?

Você rejeita essa explicação. Você a rejeita porque *sabe* que, dado um conjunto de pares de caixas, poderia ter feito *qualquer uma* das opções. *Escolheu* livremente qual experimento fazer. Você tem livre-arbítrio. Pelo menos as suas escolhas não foram predeterminadas por uma situação física externa ao seu corpo, pelo que supostamente estaria "de fato" nos pares de caixas.

Teria a sua livre escolha determinado a situação física externa? Ou teria a situação física externa predeterminado a sua escolha? Seja o que for, qualquer uma das duas alternativas não faz sentido. É o enigma quântico não resolvido.

Um ponto importante: vivenciamos um enigma porque acreditamos que *poderíamos ter feito* algo diferente do que de fato fizemos. A negação dessa liberdade de escolha requer que nosso comportamento seja programado de maneira a correlacionar o mundo exterior ao nosso corpo. O enigma quântico surge da nossa *percepção consciente* do livre-arbítrio. Esse mistério que liga a consciência ao mundo físico revela o encontro da física com a consciência.

Criação da história

Pelo menos em certa medida, nossas ações presentes obviamente determinam o futuro. Mas, obviamente, nossas ações *presentes* não podem determinar o *passado*. O passado é a "verdade imutável da história". Será que é mesmo?

Achar um átomo numa caixa única significa que o átomo inteiro chegou a essa caixa percorrendo um *único* caminho após seu encontro anterior com o espelho semitransparente. Escolher um experimento de interferência estabeleceria uma história *diferente*, em que aspectos do átomo percorreram *dois* caminhos para *as duas* caixas depois do seu encontro anterior com o espelho semitransparente.

A criação da história passada é ainda mais contraintuitiva que a criação da situação presente. Não obstante, é isso o que implica o experimento com os

pares de caixas, ou qualquer versão do experimento da dupla fenda. A teoria quântica faz com que *qualquer* observação crie seu histórico. (Veremos isso apresentado de modo impressionante com a história do gato de Schrödinger.)

EM 1984, o cosmólogo quântico John Wheeler sugeriu que a criação da história da teoria quântica sofresse um teste direto. Ele retardaria a escolha de qual experimento fazer até *depois* que o objeto tomasse sua "decisão" no espelho semitransparente: se seguiria um único caminho ou se percorreria os dois. Seria difícil demais fazer um experimento prático com átomos em pares de caixas, então foram utilizados fótons e um arranjo de espelho muito parecido com o da figura 7.4. A obtenção dos mesmos resultados alcançados no experimento quântico usual implicaria que o histórico teria sido de fato criado pela escolha posterior de qual experimento fazer.

Um ser humano leva talvez um segundo para tomar uma decisão consciente de qual experimento fazer. Mas em um segundo um fóton percorre quase 300 mil quilômetros. Não podemos construir um equipamento tão grande, nem fazer o fóton ricochetear de um lado a outro numa caixa durante um segundo. No teste real, a "escolha" do experimento foi portanto feita por um rápido interruptor eletrônico comandado por um gerador de números aleatórios. A versão mais rigorosa do experimento só foi feita em 2007, quando pulsos confiáveis de fóton único puderam ser gerados e já estava disponível uma eletrônica suficientemente rápida. O resultado foi (é claro?) que as predições da teoria quântica foram confirmadas. A observação criava o histórico. Nas palavras de Wheeler: "Temos uma estranha inversão da ordem normal do tempo … um efeito inevitável sobre o que temos o direito de dizer sobre a história já passada desse fóton."

O enigma é mostrado experimentalmente

Em nosso experimento dos pares de caixas, descrevemos somente o que você de fato veria. Nunca nos referimos à *teoria* quântica. Compare esse enigma *quântico* com o enigma do determinismo newtoniano. Levado à sua conclusão

lógica extrema (como às vezes se faz), o determinismo newtoniano nega a possibilidade do livre-arbítrio. No entanto, esse enigma newtoniano surge apenas da *teoria* determinista newtoniana. A física clássica não prediz nenhuma consequência *experimental* que desafie a crença de que nossa livre escolha possa surgir inteiramente dentro do nosso corpo.

O enigma quântico, por outro lado, surge diretamente do experimento. É mais difícil ignorar um enigma que nasce diretamente da observação experimental do que um que deriva apenas da teoria.

Se o enigma quântico é independente da teoria quântica, por que o chamamos de "enigma *quântico*"? Porque experimentos neutros em termos de teoria, como o experimento da dupla fenda, formam a *base* da teoria quântica. A teoria quântica fornece a descrição matemática que prediz corretamente os resultados dos experimentos, das observações que *escolhemos* fazer.

A descrição da teoria *quântica*

Agora que estabelecemos a base *experimental* do enigma, vamos oferecer a explicação da teoria quântica. Já que podemos escolher observar um átomo em qualquer uma de duas situações contraditórias, como a teoria quântica descreve o estado do átomo *antes* de o observarmos? A teoria descreve o mundo em termos matemáticos. Nesses termos, quando um átomo pode ser *observado* em qualquer uma de duas situações – ou "estados" – contraditórias, a função de onda da situação física total é escrita como a *soma* das funções de onda desses dois estados separadamente. Expressando essa matemática em palavras, a função de onda de um desses estados é "o átomo está inteiramente na caixa de cima". A função de onda do outro estado é "o átomo está inteiramente na caixa de baixo". A função de onda do átomo não observado é "o átomo está inteiramente na caixa de cima" mais "o átomo está inteiramente na caixa de baixo". Diz-se que o átomo está numa "superposição" desses dois estados. Ele está simultaneamente em ambos os estados. Ao olhar uma caixa, essa soma, ou superposição, colapsa aleatoriamente para um ou outro termo da superposição. Mas, antes de olharmos,

o átomo está simultaneamente em ambas as caixas. O átomo está em dois lugares ao mesmo tempo.

A OBSERVAÇÃO FAZ colapsar a ondulatoriedade, a probabilidade, para uma realidade específica. Mas o que constitui uma “observação”? Em última análise, a observação não é explicada dentro da teoria quântica. O que constitui observação é controverso. A pragmática interpretação de Copenhague da mecânica quântica, a posição “ortodoxa” da física (discutida mais amplamente no capítulo 10), define como observação qualquer registro de um evento microscópico por um instrumento de medição macroscópico. Ou, mais estritamente, *qualquer* interação de um sistema microscópico com um sistema macroscópico constitui uma observação se tornar essencialmente impossível uma demonstração de interferência. Nem todos os físicos aceitam essa interpretação “para todos os propósitos práticos” de observação. Por enquanto, deixaremos o assunto de lado. Podemos, no entanto, dizer aquilo que todos os físicos concordam que *não* constitui uma observação.

Quando um objeto microscópico encontra um segundo objeto microscópico, o primeiro objeto “observa” o segundo? Não. Como exemplo, considere um átomo no nosso par de caixas, simultaneamente nas duas caixas. Digamos que um fóton seja enviado através do tampo (transparente) da caixa de cima. Caso o átomo *esteja realmente* nessa caixa, o fóton será desviado. Se, ao contrário, o átomo estiver na caixa inferior, o fóton atravessará direto a caixa de cima. Será que o fóton “observou” se o átomo estava ou não na caixa de cima? Não. O fóton entrou em estado de superposição com o átomo. Dizemos que se “emaranhou” com o átomo. Um experimento de interferência bastante complicado poderia na verdade estabelecer que esse sistema emaranhado átomo-fóton estava num estado no qual o fóton era *igualmente* desviado pelo átomo e *não* desviado pelo átomo.

Quando esse fóton simultaneamente desviado e não desviado mais tarde encontrasse outros objetos, qualquer coisa macroscópica, digamos um contador Geiger, não seria possível nenhuma demonstração de interferência, para todos os

propósitos práticos. Podemos então considerar que uma observação foi feita, e que a função de onda colapsou. Vendo se o contador Geiger foi ou não acionado, poderíamos seguramente dizer se o fóton ricocheteou ou não no átomo, e portanto se o átomo estava ou não na caixa de cima.

TEMOS ENFATIZADO UM enigma quântico surgindo a partir de observações experimentais neutras em termos de teoria quântica. Pode-se ver um enigma diferente surgindo a partir da teoria quântica. A teoria coloca o átomo no nosso par de caixas num estado de superposição, com a ondulatoriedade igualmente distribuída em ambas as caixas. Mas, ao olharmos, descobrimos o átomo inteiro numa caixa só. Como é que a natureza decide um resultado *particular*, uma caixa *particular*, quando a teoria quântica, a nossa descrição mais básica da natureza, só nos dá probabilidade?

É inexplicável. Há uma aleatoriedade intrínseca associada com as observações. Escolhendo observar o átomo inteiramente numa só caixa, não podemos escolher em *qual* caixa ele aparecerá. Ou, ao escolher um experimento de interferência, não podemos escolher em *qual* das regiões permitidas o átomo aparecerá. Podemos escolher o jogo, mas não o resultado específico. As funções de onda colapsam com aleatoriedade. (Invocações pseudocientíficas de mecânica quântica podem ignorar essa aleatoriedade para concluir que a escolha de pensamentos que alguém faz, sozinha, pode provocar um resultado desejado específico.)

MOSTRAMOS A *posição* de um objeto sendo criada pela observação. A criação pela observação aplica-se também a todas as outras propriedades. Por exemplo, muitos átomos são minúsculos ímãs com polo norte e polo sul. O átomo pode ser colocado em estado de superposição com seu polo norte apontando simultaneamente para cima e para baixo. Mas uma observação dessa orientação sempre resulta em para cima *ou* para baixo.

Embora tenhamos falado apenas sobre o átomo, presume-se que a teoria quântica se aplique a tudo. Mais adiante chegaremos à história de Schrödinger estendendo esse raciocínio para o *impossível na prática*, mas logicamente consistente com a teoria quântica – a situação de um gato em dois estados contraditórios, vivo e morto ao mesmo tempo. Algo que esteja ao mesmo tempo em dois estados mutuamente excludentes é confuso. Alguma confusão será esclarecida em capítulos posteriores. Mas não toda ela! Acabamos de confrontar o ainda não resolvido, e decididamente controverso, enigma quântico. Contudo, os resultados *experimentais* que descrevemos são totalmente inquestionáveis.

NO PRÓXIMO CAPÍTULO, vamos considerar as mesmas ideias num tom mais leve.

8. Nosso esqueleto no armário

> A interpretação [da mecânica quântica] tem se mantido como uma fonte de conflito desde sua criação. … Para muitos físicos ponderados, ela continua sendo uma espécie de "esqueleto no armário".
>
> J.M. JAUCH

EM SEU LIVRO *Dreams of a Final Theory*, o prêmio Nobel Steven Weinberg escreve: "A única parte da física atual que me parece provável que permanecerá inalterada em uma teoria final é a mecânica quântica." Nós compartilhamos a intuição de Weinberg sobre o caráter correto final da mecânica quântica.

John Bell, figura importante nos capítulos finais deste livro e que provavelmente teria ganhado o prêmio Nobel se este fosse concedido postumamente, sentia que "a descrição da mecânica quântica será suplantada. … Ela transporta em si as sementes de sua própria destruição". Bell na realidade não discorda de Weinberg. Sua preocupação com a mecânica quântica não é que seja encontrado um erro em qualquer uma de suas previsões, mas que ela não seja a história inteira. Para ele, a mecânica quântica revela a incompletude de nossa visão de mundo. Ele sente que é provável "que o novo modo de ver as coisas envolva um salto imaginativo que nos deixará estarrecidos". (Incidentalmente, Bell conta que foi uma aula de Jauch – que citamos acima – que inspirou suas investigações sobre os fundamentos da mecânica quântica.)

Junto com Bell, desconfiamos que algo além da física comum está à espera de uma descoberta. Nem todos os físicos concordariam. Muitos, se não a maioria, preferem minimizar o enigma, como algo a que simplesmente deveríamos nos acostumar. É o nosso "esqueleto no armário".

No entanto, a existência de um enigma não é uma questão física. É *meta*física no sentido original da palavra. (*Metafísica* é o nome da obra de Aristóteles que se seguiu ao texto científico *Física* e que trata de questões

filosóficas mais gerais.) Quando o assunto é metafísica, os não físicos com uma compreensão geral de *fatos* experimentais – fatos sobre os quais não há discussão – podem ter uma opinião cuja validade se equipara à dos físicos.

Ilustramos esse ponto com uma história na qual uma professora de física de mentalidade ortodoxa demonstra alguns fatos experimentais básicos da mecânica quântica (descritos no capítulo anterior) para um Grupo de Pessoas Racionais e de Mente Aberta (Gruprama) que nunca entrou em contato com a teoria quântica que explica tais fatos. O que nossa professora demonstra para o Gruprama é análogo à experiência do visitante a Eug Ahne Poc. Embora aquilo que foi exibido em Eug Ahne Poc *não* seja realmente possível, a perplexidade do visitante é a mesma que o Gruprama experimenta a partir de uma demonstração do que *é* realmente possível. Você pode participar dessa perplexidade; nós participamos – é o enigma quântico.

Após sua demonstração, nossa professora de física oferece a explicação padrão da teoria quântica para o que foi visto, a explicação que geralmente satisfaz os alunos nos nossos cursos de mecânica quântica. A preocupação deles com os cálculos de física que enfrentarão em seus exames supera o interesse no *significado* do que estão calculando. O Gruprama, por outro lado, está preocupado com o que tudo isso pode *significar*. Ao discutir o enigma, esperamos que você possa se identificar com o Gruprama. Nós nos identificamos.

O “APARATO” QUE nossa professora de física usa é a caricatura de uma montagem real de laboratório. Mas os fenômenos quânticos que ela demonstra são bem estabelecidos para objetos pequenos. Esses fenômenos atualmente estão sendo exibidos com objetos cada vez maiores. Proteínas de tamanho médio, e até mesmo vírus, são objeto de experimentos atuais. A teoria quântica não impõe limites. O tamanho dos objetos mostrados para exibir tais fenômenos quânticos parece restrito apenas pela tecnologia e pelo orçamento.

Poderíamos ser absolutamente genéricos em nossa história e falar do experimento sendo feito com “objetos”. Isso soa vago. Não há motivo para não podermos pensar nos nossos objetos como bolinhas de gude verdes. O experimento poderia na realidade ser feito com “bolinhas de gude verdes”, contanto que fossem *muito* pequenas, do tamanho de, digamos, uma molécula grande. Então, para nossa história, falaremos em termos de bolinhas.

Nossa professora de física recebe calorosamente o Gruprama, dizendo: “Pediram-me que demonstrasse a vocês a estranha natureza da ‘observação’ e lhes contasse a explicação da teoria quântica para aquilo que vocês verão. Às vezes nós, físicos, hesitamos em chamar a atenção para essa estranheza porque isso pode fazer a física parecer mística. Mas me garantiram que vocês são um grupo de pessoas racionais, de mente aberta, para quem isso não é problema. Acredito poder lhes mostrar algo realmente extraordinário.”

O primeiro experimento da nossa professora deve lembrar a você o visitante a Eug Ahne Poc perguntando: “Em qual choupana está o casal?” A resposta que ele sempre obtinha demonstrava que o casal estava inteiramente em uma choupana ou na outra.

Nossa professora aponta um conjunto de caixas, cada uma formando par com alguma outra. Ela explica que seu aparato introduz uma única bolinha em cada *par* de caixas. “Os detalhes de como meu equipamento funciona”, diz ela, “não têm importância.” O Gruprama aceita isso. Eles veem como ela coloca um par de caixas na extremidade direita do equipamento, deixa cair uma bolinha num pequeno funil à esquerda e então remove o par de caixas. Ela repete o procedimento, acumulando algumas dúzias de pares.

Ao contrário do pessoal do Gruprama, você já travou contato com a teoria quântica. Portanto, chamamos atenção para o fato de que o equipamento da nossa professora de física envolve um conjunto de espelhos apropriado para

dividir a ondulatoriedade de cada "bolinha de gude" igualmente em ambas as caixas de cada par.

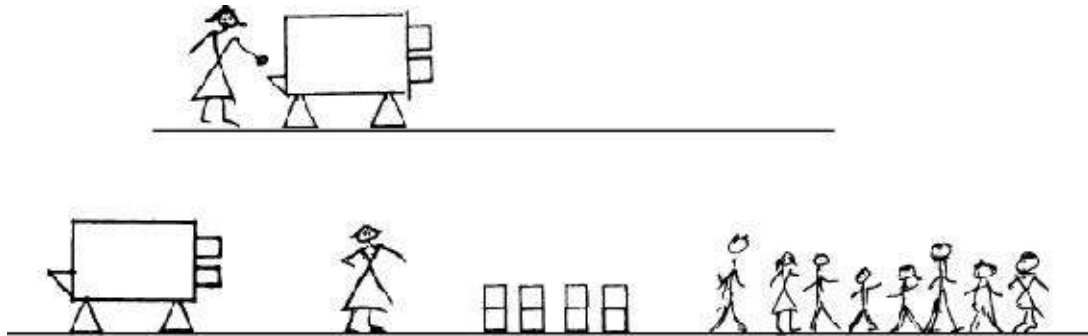



FIGURA 8.1

"Meu primeiro experimento", explica nossa professora, "determinará qual caixa de cada par contém a bolinha." Apontando para um par, ela faz sinal para um membro do Gruprama que parece bastante ansioso e pede: "Você pode, por favor, abrir cada caixa e ver qual delas contém a bolinha?"

Abrindo a primeira caixa, o rapaz anuncia: "Aqui está ela."

"Certifique-se de que a outra caixa está completamente vazia", solicita a nossa professora de física.

Olhando cuidadosamente, ele afirma com segurança: "Está completamente vazia. Não há nada dentro dela."

Após ele terminar de examinar as caixas, nossa professora pede a uma moça atenta que repita o procedimento de descobrir qual caixa de um outro par contém a bolinha. Abrindo a primeira caixa, a moça comenta: "Está vazia. A bolinha deve estar na outra caixa." E, de fato, ali está ela.

Nossa professora de física repete o procedimento diversas outras vezes. A bolinha de gude aparece aleatoriamente ou na primeira ou na segunda caixa a ser aberta. Ela logo nota que os membros do Gruprama não estão prestando muita atenção e cochichando entre si. Ouve então um sujeito dizer à mulher ao seu lado: "Qual é o sentido disso? Não tem nada a ver com a demonstração extraordinária que nos prometeram."

Apesar de o comentário não ser dirigido a ela, nossa professora responde: "Sinto muito, só quero convencê-los de que, quando olhamos para descobrir qual caixa de um par contém a bolinha, demonstramos que há uma bolinha inteira numa caixa e que a outra está completamente vazia. Por favor, acompanhem-me, porque agora eu gostaria de mostrar a vocês que não importa *como* descobrimos em qual caixa a nossa bolinha está. Eis um outro jeito de descobrir."

Ela coloca um par de caixas diante de uma tela aderente e abre uma caixa. Não é possível ver a rápida bolinha, mas ouve-se um "plink", e a bolinha gruda na tela. "Ah, a bolinha estava na primeira caixa", diz ela. "Portanto, nenhuma bolinha atingirá a tela quando eu abrir a segunda caixa."

"É óbvio", ouve-se o murmúrio de alguém ao fundo do Gruprama.

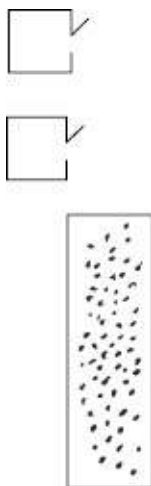



FIGURA 8.2 As caixas são abertas em sequência, com os resultados na tela.

Embora volte a ficar difícil manter a atenção do Gruprama, nossa professora de física repete a demonstração com outros pares de caixas. Se uma bolinha atinge a tela quando ela abre a primeira caixa, nada surge quando ela abre a segunda. Se não aparece nenhuma bolinha na tela ao abrir a primeira, há sempre uma bolinha na segunda. A tela vai ficando gradualmente salpicada de bolinhas, distribuídas mais ou menos uniformemente pela sua superfície.

“Vocês conseguem perceber”, pergunta ela, “que esta também é uma demonstração de que há uma bolinha numa das caixas de cada par e que a outra está vazia?”

“Claro que sim, mas onde está a *extraordinária* demonstração que você prometeu?”, resmunga um sujeito. “É claro que não importa *como* você olha. O seu equipamento pôs uma bolinha em uma das caixas de cada par. E daí?” Vários colegas assentem. E uma mulher sem papas na língua declara: “Ele está certo!”

“Na verdade”, diz nossa professora, hesitante, “a coisa extraordinária, que eu espero demonstrar, é que o que ele acabou de dizer *não* está tão certo assim. Mas deixem-me tentar primeiro outro experimento.”

O experimento seguinte feito por nossa professora deve lembrar a você o visitante a Eug Ahne Poc perguntando: “Em qual choupana está o homem e em qual está a mulher?” A resposta que ele sempre recebia demonstrava que o casal estava distribuído nas duas choupanas.

O Gruprama educadamente se acalma para assistir ao novo experimento.

Nossa professora posiciona um novo conjunto de caixas na frente na tela aderente e rapidamente abre *ambas* as caixas do par. “A diferença neste próximo experimento”, ressalta ela, “é que estou abrindo as duas caixas ao mesmo tempo.” Um “plink” indica o impacto da bolinha na tela. Descartando esse par, nossa professora posiciona cuidadosamente outro par no mesmo local e abre novamente as duas caixas ao mesmo tempo. Ouve-se outro “plink” quando a bolinha atinge a tela.

Bolinhas vão se acumulando na tela à medida que ela abre mais pares simultaneamente. Um sujeito de camisa vermelha pergunta preguiçosamente: “Este experimento não demonstra ainda menos que o primeiro? Como agora

você está abrindo as duas caixas ao mesmo tempo, para este conjunto não podemos sequer dizer de que caixa a bolinha saiu.”

Mas, antes que esse comentário seja levado a sério, uma mulher na primeira fila que tinha se mantido em silêncio diz: “Os pontos onde as bolinhas atingem a tela parecem formar um desenho regular.”

Agora todos observam atentamente. À medida que mais bolinhas vão atingindo a tela, o padrão emerge distintamente. As bolinhas só caem em certos lugares. Em outros pontos da tela não há bolinhas. Cada bolinha segue uma regra que lhe permite atingir apenas certos lugares e a proíbe de atingir outros.

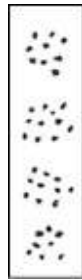



FIGURA 8.3 Resultados na tela de caixas abertas simultaneamente.

A mulher que primeiro notou o padrão parece intrigada e agora pergunta: “No seu primeiro experimento, quando as caixas de cada par foram abertas separadamente, as bolinhas estavam uniformemente distribuídas na tela. Como é que abrir a caixa *vazia* junto com a que contém a bolinha afeta o ponto em que bolinha cai?”

Nossa professora, encantada com a pergunta, responde prontamente: “Você está certa! Abrir a caixa que estava realmente vazia não poderia afetar a bolinha. Eu lhes disse que havia uma bolinha em cada *par* de caixas. Mas não está realmente certo dizer que uma caixa continha a bolinha e a outra estava vazia. Cada e toda bolinha estava simultaneamente em ambas as caixas do par.”

Reagindo ao olhar de dúvida na expressão de diversos membros do Gruprama, nossa professora de física continua: “Eu sei que é difícil de acreditar, mas há um meio bastante convincente de demonstrar isso. Só leva um pouquinho de tempo.”

O Gruprama bate papo e relaxa enquanto nossa professora e seu assistente, um aluno de pós-graduação, preparam rapidamente três conjuntos de pares de caixas, cada um com doze ou mais pares. Agora, recuperando a atenção do grupo, ela repete o abrir simultâneo de ambas as caixas de cada par. Mas, dessa vez, com cada um dos três conjuntos ela usa um espaçamento diferente para os pares de caixas.

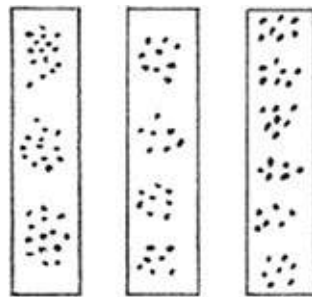



FIGURA 8.4 Resultados de caixas com espaçamentos diferentes abertas simultaneamente.

“Notem que, quanto mais separadas estão as caixas do par, mais próximo é o padrão de espaçamento das bolinhas na tela. A regra que *cada e toda* bolinha obedece – que diz a cada bolinha os pontos onde tem permissão de cair – depende do espaçamento do seu par de caixas. Portanto, cada bolinha ‘sabe’ qual é esse espaçamento. Cada bolinha deve ter ocupado, portanto, ambas as caixas do seu par.”

“Espere um segundo, professora”, um jovem se intromete na explicação.

“Você está dizendo que a bolinha estava em *dois lugares ao mesmo tempo*, que ela saiu de *ambas* as caixas. Isso é bobagem!… Ups, hã, desculpe, professora.”

“Não tem problema, meu jovem”, responde nossa professora de física. “Você tem razão. A bolinha estava simultaneamente em dois lugares. Estava *nas duas* caixas. A abordagem científica consiste em aceitar o que a natureza nos diz independentemente das nossas intuições. Uma única bolinha saindo de duas caixas pode parecer bobagem, mas demonstrações experimentais não nos deixam alternativa.”

Isso requer um pouco de ponderação. Porém, apenas um ou dois minutos depois, o sujeito de camisa vermelha volta a falar: “Há uma alternativa, uma alternativa *óbvia*. No seu primeiro experimento, em que abriu as caixas uma de cada vez, vimos que uma caixa de cada par estava completamente vazia. Mas, como você acabou de dizer, nesses outros conjuntos de caixas, as bolinhas estavam divididas de modo que *algo* de cada uma delas estava em ambas as caixas do par. Está claro que esses conjuntos de caixas foram *preparados* de forma diferente.”

Nossa professora de física para com as mãos nos quadris para permitir que a ideia seja absorvida antes de comentar: “Essa é uma hipótese razoável. Mas na verdade todos os pares de caixas foram preparados de maneira idêntica. Vou convencer vocês de que essa não é a questão usando alguns conjuntos de pares de caixas que vamos preparar.”

FIGURA 8.5 Desenho de Charles Addams. © Tee and Charles Addams Foundation.

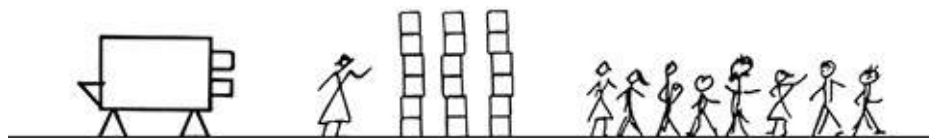



FIGURA 8.6

O terceiro experimento da nossa professora de física deve lembrar a você o visitante a Eug Ahne Poc fazendo qualquer uma das perguntas. Ele podia escolher livremente demonstrar que o casal estava numa choupana só ou distribuído nas duas choupanas. Isso o deixou perplexo.

Depois do intervalo para o café, durante o qual nossa professora e seu assistente prepararam e empilharam diversos conjuntos de pares de caixas, o Gruprama volta a se reunir. Um homem intrigado diz: “Estivemos conversando sobre o que você disse, e pelo menos alguns de nós estão confusos. Alguns acharam que você alegou demonstrar que uma das caixas de cada par estava *vazia*. Então, depois você afirmou que *nenhuma* estava vazia. São duas situações contraditórias. Eles entenderam mal, não foi?”

“Bem, entenderam quase certo. Que situação você gostaria de demonstrar com *este* grupo de pares de caixas?”

Tomado de surpresa, o autor da pergunta hesita, mas a mulher a seu lado rapidamente se apresenta: “Tudo bem, mostre-nos que para este conjunto uma caixa de cada par está vazia.”

Nossa professora repete o primeiro experimento, abrindo as caixas de uma dúzia de pares uma por vez. Em cada par, ela revela uma bolinha de gude em uma das caixas e mostra que a outra está vazia. Ela comenta: “E lhes asseguro que não importa como as caixas vazias sejam investigadas, nada jamais seria encontrado nelas.”

Um sujeito cooperativo aponta então outro conjunto de pares de caixas e pede: “Pode nos mostrar que para este outro conjunto de pares de caixas *nenhuma* está vazia?”

“Claro, posso fazer isso.” E nossa professora, abrindo ambas as caixas de cada par simultaneamente, executa o experimento com uma dúzia de pares de caixas, demonstrando que cada bolinha deve ter ocupado *ambas* as caixas de seu par.

Várias vezes nossa professora de física demonstra uma *ou* outra das duas situações aparentemente contraditórias, conforme escolhido por um membro do Gruprama.

Um sujeito na primeira fila exclama bruscamente, no meio de uma das demonstrações: “O que você está nos dizendo – e admito que parece estar demonstrando – não faz sentido. É logicamente inconsistente… Ah, eu peço desculpas, não tive a intenção de interromper.”

“Não, não, tudo bem”, nossa professora o tranquiliza. “Você está levantando um ponto importante.”

Assim, ele continua: “Você alega demonstrar que ambas as caixas de cada par contêm pelo menos alguma coisa da bolinha, mas supostamente também

mostra que uma caixa de cada par está totalmente vazia. Isso é logicamente inconsistente.”

“Você teria razão”, retruca nossa professora, “se mostrássemos esses dois resultados para o *mesmo* conjunto de caixas. Mas, como na realidade fizemos as duas demonstrações com dois conjuntos *diferentes* de pares de caixas, não há inconsistência *lógica*.”

Uma mulher levanta uma objeção: “Mas, para os pares de caixas com que você demonstrou uma coisa, nós *poderíamos* ter pedido que você demonstrasse o contrário.”

“Mas não pediram”, é a resposta quase casual da nossa professora. “Previsões para experimentos não feitos não podem ser testadas. Portanto, *logicamente*, não há necessidade de considerá-los.”

“Ah, não, aí já é forçar a barra”, contrapõe o questionador original. “Nós somos seres humanos conscientes, temos livre-arbítrio. *Poderíamos* ter feito a outra escolha.”

Nossa professora se contorce um pouco: “Consciência e livre-arbítrio são na verdade questões para a filosofia. Admito que esses assuntos são levantados pela mecânica quântica, mas a maioria de nós, a maioria dos físicos, prefere evitar tal discussão.”

Um questionador anterior está insatisfeito: “Tudo bem”, reclama ele, “mas você concorda que, antes de olharmos, uma caixa de cada par na realidade tinha uma bolinha ou estava vazia. Vocês, físicos, acreditam num mundo fisicamente real, não?”

Ele considerava sua pergunta retórica. Pelo menos esperava um “Sim, é claro” como resposta.

Mas nossa professora de física hesita, e mais uma vez parece evasiva: “O que existia antes de olharmos, aquilo que você chama de ‘mundo fisicamente

real', é outra questão que a maioria dos físicos prefere deixar para os filósofos. Para todos os propósitos práticos, basta que lidemos com o que vemos quando de fato olhamos."

"Mas você está dizendo uma coisa louca sobre o mundo!", exclama o questionador. "Está dizendo que aquilo que existia anteriormente é criado pela forma como olhamos alguma coisa." A maioria dos presentes assente; outros parecem perplexos.

"Ei, prometi que mostraria a vocês algo extraordinário. E mostrei, não foi?" Reagindo a alguns assentimentos e cenhos franzidos, ela prossegue: "Descobrimos que o mundo é mais estranho do que um dia imaginávamos, talvez mais estranho do que *possamos* imaginar. Mas é assim que as coisas são."

"Espere aí!", uma mulher antes calada diz com firmeza. "Você não pode se safar evitando as questões que a sua demonstração levanta. Deve haver uma explicação. Por exemplo, em vez de estar nas duas caixas, talvez toda bolinha tenha um tipo de radar indetectável que lhe informe a separação do seu par de caixas."

"Nunca podemos desconsiderar coisas 'indetectáveis'", admite nossa professora. "Mas uma teoria sem consequências testáveis além do que foi inventado para explicar não é científica. Igualmente útil como a sua teoria de 'radar indetectável' seria supor que uma fada invisível cavalga e guia cada bolinha." Percebendo ter constrangido a proponente da teoria do radar, nossa professora se retrata: "Desculpe, fui injusta. Especulações como a sua podem ser úteis como pontos de partida para desenvolver teorias *testáveis*."

"Tudo bem, não fiquei ofendida."

"Na verdade, já temos uma teoria que explica tudo o que demonstrei", continua nossa professora de física, "e muito, muito mais. É a teoria quântica. Ela é básica para toda a física e a química, e grande parte da

tecnologia moderna. Mesmo teorias do Big Bang baseiam-se na teoria quântica."

"Por que você não a usou para explicar as suas demonstrações?", questiona uma mulher sentada com o queixo apoiado nas mãos.

"Eu poderia ter feito isso", replica nossa professora, "mas queria mostrar um ponto importante: que a coisa extraordinária que demonstrei – que a condição física da bolinha depende da livre escolha que você faz do experimento – surge *diretamente dos fatos experimentais*. O enigma é apresentado pelo *experimento* quântico; ele não é meramente *teórico*. Mas, agora que vocês viram a demonstração, deixem-me contar-lhes a explicação da teoria quântica para o que vimos.

"Meu equipamento", prossegue ela, "põe uma bolinha em cada par de caixas, mas não a coloca numa caixa *única*. A teoria quântica nos diz que, antes de você olhar, a bolinha estava naquilo que se chama 'superposição de estados', simultaneamente nas duas caixas. Tomar conhecimento de que ela estava numa caixa em particular *causou* o fato de ela estar totalmente naquela caixa. Mesmo que você tomasse esse conhecimento descobrindo uma caixa vazia, sem ver a bolinha, o simples fato de ganhar o *conhecimento* de que ela estava na outra caixa faria com que ela estivesse totalmente na outra caixa. Tomar conhecimento, qualquer que seja a maneira, já é suficiente."

O Gruprama (sendo um Grupo de Pessoas Racionais e de Mente Aberta) escuta educadamente. Mas o que nossa professora de física disse não é prontamente aceito.

Um homem subitamente explode: "Você está afirmando que, antes de olharmos e descobrirmos a bolinha numa das caixas, ela não estava lá, que o fato de olharmos criou a bolinha ali? Isso é tolice."

"Espere, acho que entendo o que ela está dizendo", a mulher sentada perto dele se interpõe. "Eu já li sobre mecânica quântica. Penso que ela está simplesmente querendo dizer que a função de onda da bolinha, que é a

probabilidade de onde a bolinha está, estava nas duas caixas. A bolinha real estava, é claro, numa caixa ou na outra."

"A primeira parte do que você disse está certa", diz a nossa professora de física em tom de incentivo. "O que estava em cada caixa era de fato metade da função de onda da bolinha de gude. A ondulatoriedade é a probabilidade de encontrar uma bolinha na caixa. Mas não existe 'bolinha real' além da função de onda da bolinha. A função de onda é a *única* coisa que a física descreve – é portanto a única coisa *física*."

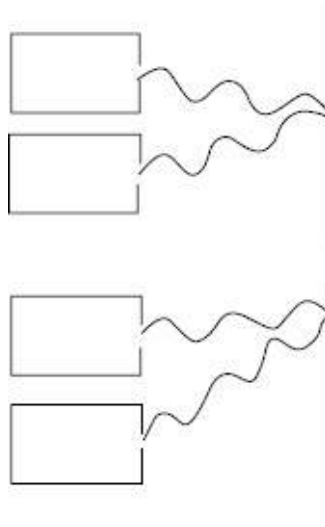



FIGURA 8.7 Reforço e cancelamento de ondas de ambas as caixas.

Nossa professora vê testas franzidas e olhos revirados para cima. Ela está contente por eles terem (supostamente) a mente aberta. "Observem como a teoria quântica explica de um jeito bacana o padrão que obtemos quando abro as caixas ao mesmo tempo", continua ela. "As partes da função de onda que estavam em cada caixa se propagam espalhando-se pela tela detectora."

Movendo as duas mãos como ondas ela vai falando: "As duas partes da função de onda são ondas movendo-se para fora de cada caixa rumo à tela. Em alguns pontos da tela, as cristas de onda de uma caixa chegam junto com as cristas de onda da outra, e as funções de onda das duas caixas se somam nesse lugar da tela.

“É um ponto de grande ondulatoriedade, com alta probabilidade de encontrar uma bolinha. Em outros pontos da tela, as cristas de uma caixa chegam ao mesmo tempo que os vales da outra, e as funções de onda das duas caixas se cancelam. É um local de ondulatoriedade zero, com probabilidade zero de se encontrar uma bolinha. É assim que cada bolinha segue a regra que lhe diz onde pode pousar. Essa soma e cancelamento de ondas é chamada ‘interferência’ e explica o conhecido ‘padrão de interferência’ que vemos.”

Satisfeita por ter conseguido demonstrar esse ponto, nossa professora fica parada sorrindo com as mãos nos quadris.

Uma mulher com ar pensativo responde lentamente: “Eu compreendo como ondas – você as chama de funções de onda – podem criar padrões de ondulatoriedade. Chegamos a ver isso em ondas de água. Mas probabilidade tem de ser probabilidade *de* alguma coisa. A ondulatoriedade não é a probabilidade *de* uma bolinha real estar em algum lugar?

“A função de onda da bolinha em alguns lugares dá a probabilidade de você *encontrar* a bolinha ali”, enfatiza nossa professora. “Não havia bolinha real ali antes de você olhar e achá-la naquele lugar.

“Eu sei que isso não é fácil de aceitar”, prossegue ela em tom compreensivo. “Vou colocar em outras palavras. Considere uma bolinha de gude cuja função de onda esteja distribuída igualmente pelas duas caixas. Se você olhar em qualquer uma das caixas, descobrirá onde a bolinha está. A probabilidade torna-se igual a 1 numa das caixas e zero na outra. A ondulatoriedade colapsa totalmente numa única caixa. Essa ondulatoriedade concentrada, que a sua observação *criou*, é o que você chama de bolinha real. Mas o fato de podermos ver um padrão de interferência prova que não havia bolinha real numa caixa só antes de você olhar.”

“Espere aí um instante!”, diz um sujeito que há algum tempo vinha balançando a cabeça. “Você colocou em outras palavras, então vou colocar em outras palavras: se a teoria quântica diz que, ao observar algo em algum lugar, eu crio essa coisa lá, ela está dizendo algo ridículo!”

“Quem sabe você pudesse dizer ‘chocante’?”, retruca nossa professora. “Niels Bohr, um dos fundadores da teoria quântica, disse certa vez que qualquer um que não fique chocado com a mecânica quântica não a entendeu. Mas nenhuma previsão da teoria já esteve errada. Você concorda, não é mesmo, que fazer previsões consistentemente corretas é o *único* critério que uma teoria científica precisa satisfazer? Esse tem sido o método da ciência desde Galileu. Se se encaixa ou não na nossa intuição é algo que deve ser considerado irrelevante.”

A essa altura, outra moça do Gruprama não consegue mais se conter: “Se você está dizendo que coisas não observadas são apenas probabilidades, que nada é real até que observemos, está dizendo que vivemos num mundo de sonho. Está tentando nos impingir algum solipsismo tolo.”

“Bem”, retruca nossa professora de física calmamente, “há uma consolação. As coisas grandes com as quais lidamos na verdade são bastante reais. Lembrem-se, é preciso fazer um experimento de interferência para efetivamente *demonstrar* a criação por observação. E não é prático fazê-lo com coisas grandes. Nossas bolinhas são muito pequenas. Então, para todos os propósitos *práticos*, não há por que se preocupar.”

Enquanto, abalada, essa moça ferve em silêncio, outra ergue hesitantemente a mão e diz: “Se coisas pequenas não são reais, como as grandes podem ser? Afinal, coisas grandes são apenas conjuntos de coisas pequenas. Uma molécula de água é simplesmente um átomo de oxigênio com dois de hidrogênio, e um cubo de gelo é apenas um conjunto de moléculas de água, e uma geleira é apenas um enorme cubo de gelo. Será que criamos a geleira olhando para ela?”

Nossa professora agora está visivelmente constrangida. “Bem, num certo sentido… é meio complicado… mas, como eu disse, para todos os propósitos práticos realmente não importa, então…” Então, notando um membro do Gruprama com expressão amigável, nossa professora o convida a falar com

um sorriso.

Tentando ser conciliador, ele se manifesta: “Talvez você esteja nos conduzindo para a noção de que ‘Nós criamos nossa própria realidade’. Às vezes me sinto exatamente assim.”

“Oh, eu posso concordar com isso”, assente a nossa professora. “Mas esse tipo de ‘realidade’ é um pouco diferente. Quando digo: ‘Eu crio a minha própria realidade’, estou falando de uma realidade *subjetiva*. Estou dizendo que aceito a responsabilidade pelas minhas percepções pessoais e pela minha situação social – pelo menos algo assim. A realidade da qual estamos falando aqui é a realidade *objetiva*, a realidade física. Uma observação cria uma situação objetiva, que é a mesma para todo mundo. Depois que você olha em uma das caixas e colapsa totalmente a função de onda da bolinha numa caixa específica, qualquer outra pessoa achará a bolinha ali – mesmo que possamos ter demonstrado que não estava totalmente lá antes de você olhar.”

A moça do Gruprama que vinha fervendo em silêncio agora fala, um pouco alto demais: “Essa criação da realidade da qual você está falando é maluca! A sua teoria quântica pode *funcionar* perfeitamente, mas é absurda! As pessoas estão deixando vocês, físicos, se safarem com esse absurdo?”

“Suponho que sim”, retruca nossa professora de física.

“Então, vocês estão assassinando a racionalidade!”

“Bem, geralmente deixamos o esqueleto no armário.”

IMAGINAMOS QUE VOCÊ possa se identificar com o Gruprama. Nós nos identificamos, pelo menos quando tentamos entender com a mente aberta o que está realmente se passando. A melhor coisa a fazer quando se fica perplexo é voltar e ponderar sobre a demonstração dos fatos brutos, a nossa versão dos pares de caixas do experimento quântico arquetípico.

Agora vamos ver como parar de nos preocupar e amar a mecânica quântica, pelo menos *pragmaticamente*, voltando-nos para a interpretação de Copenhague no capítulo 10.

9. Um terço da nossa economia

> O desenvolvimento da teoria quântica foi “a coroação das conquistas intelectuais do século passado”, diz o físico John Preskill, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech). Ela é o princípio subjacente a muitos dos aparelhos de hoje, desde lasers até equipamentos de imagens por ressonância magnética. E esses podem ser apenas os frutos nos galhos mais baixos. Muitos cientistas preveem tecnologias revolucionárias baseadas em propriedades verdadeiramente estranhas do mundo quântico.
>
> *Business Week*, 15 de março de 2004

ESTÁVAMOS PROFUNDAMENTE mergulhados nos mistérios quânticos, em nosso curso “Enigma quântico”, dirigido a estudantes que não vão se formar em ciências (embora alguns alunos de física sempre participem). Uma moça ergueu a mão e perguntou: “A mecânica quântica é útil para alguma coisa *prática*?” Eu (Bruce) fiquei mudo pelo menos por dez segundos. Na estreiteza da minha perspectiva de físico, eu simplesmente presumia que todo mundo compreendia a base quântica da nossa tecnologia. Deixei de lado minhas anotações de aula e durante o resto do tempo fiz um desvio no curso para falar das aplicações práticas da mecânica quântica.

Este breve capítulo nos conduz pelo mesmo desvio. O tema do livro são os fatos quânticos indiscutíveis que revelam o encontro da física com a consciência. Mas os mesmos fatos quânticos são básicos tanto para a ciência moderna quanto para a tecnologia atual. Após flertar com a consciência e o livre-arbítrio no capítulo anterior, é bom fazer um pouco de contato com o terreno sólido das aplicações práticas antes de decolar novamente.

A mecânica quântica é essencial para toda ciência natural. Quando os químicos fazem mais que seguir regras empíricas, suas teorias são fundamentalmente mecânica quântica. Por que a grama é verde, o que faz o Sol brilhar, ou como os quarks se comportam dentro dos prótons são todas perguntas

que precisam ser respondidas com o uso da mecânica quântica. A natureza dos buracos negros, que ainda está para ser compreendida, ou do Big Bang é buscada em termos quânticos. As teorias das cordas, que poderão conter a pista para essas coisas, começam todas com a mecânica quântica.

A mecânica quântica é a teoria mais precisa de toda a ciência. Um teste extremo é o cálculo da "razão giromagnética do elétron" com uma precisão de uma parte em 1 trilhão. (Não importa aqui o que é razão giromagnética.) Medir algo com tamanha exatidão é como medir a distância de um ponto em Nova York a um ponto em São Francisco com precisão igual à de um fio de cabelo humano. Mas isso foi feito, e a previsão da teoria acertou bem no alvo.

Embora a mecânica quântica funcione bem na ciência, qual é a sua importância *prática*? Na verdade, um terço da nossa economia envolve produtos baseados em mecânica quântica. Aqui descrevemos quatro tecnologias onde aspectos quânticos estão em primeiro plano: o laser, o transístor, os dispositivos de carga acoplada (CCDs, na sigla em inglês) e as imagens por ressonância magnética (IRM). Não entraremos em detalhes – nosso objetivo é apenas mostrar como os fenômenos quânticos entram em cena e como físicos e engenheiros lidam com as propriedades aparentemente contraditórias de entidades microscópicas.

O laser

Há uma ampla variedade de lasers. Alguns têm muitos metros de comprimento e pesam toneladas. Outros se estendem por distâncias muito menores que um milímetro. O feixe de luz vermelha que varre códigos de barras no caixa do supermercado vem de um laser. Um laser lê DVDs e escreve em impressoras a laser. Um laser poderoso pode perfurar concreto. Lasers produzem a luz para comunicação por fibras ópticas, tornando possível a internet. Fornecem informações para levantamentos geográficos e guiam “bombas inteligentes”. Usando um laser meticulosamente focalizado, um cirurgião pode reparar um descolamento de retina. Novas aplicações aparecem continuamente em medicina, comunicações, computação, indústria, entretenimento, material bélico e ciência fundamental.

A física básica para o laser surgiu em 1917 (uma década antes da equação de Schrödinger). Einstein predisse que fótons incidindo sobre átomos em estado excitado estimulariam a emissão de fótons subsequentes idênticos. Quase quarenta anos depois, Charles Townes, buscando um meio de gerar micro-ondas de comprimento de onda muito curto, percebeu uma solução no fenômeno da emissão estimulada. A primeira aplicação usava moléculas de amônia em estado excitado para amplificar micro-ondas.

Townes, é claro, percebeu que o processo físico envolvido era aplicável a todas as frequências, em particular, às frequências da luz. Sugeriu o acrônimo “laser” para *light amplification by stimulated emission of radiation* [amplificação luminosa por emissão estimulada de radiação]. (O dispositivo de micro-ondas original chamava-se “maser”.) Apenas alguns anos depois, a ação do laser foi demonstrada fazendo incidir uma luz intensa sobre um cristal de rubi sintético, excitando os átomos de crômio no cristal para um estado a partir do qual irradiavam então fótons idênticos por emissão estimulada. O relatório desse resultado surpreendentemente rápido foi na verdade rejeitado como

provavelmente equivocado pela prestigiosa revista de física americana à qual foi submetido. Mas logo foi publicado pela revista britânica *Nature*.

UM LASER PRODUZ um feixe estreito de luz de uma só frequência que pode ser focado num ponto minúsculo. Dentro de um tipo de laser, o fóton da frequência apropriada, atingindo um átomo em estado excitado, estimula a emissão de um segundo fóton exatamente de mesma frequência viajando exatamente na mesma direção – um clone. Onde tínhamos um fóton, temos agora dois. Se mantivermos muitos átomos em estado excitado, esse processo pode continuar numa reação em cadeia, produzindo muitos fótons idênticos.

Um problema que o projetista do laser precisa superar é que a probabilidade de um fóton atingir um átomo numa única passagem através do material usado no processo é pequena. A luz é portanto passada repetidamente de um lado a outro do material, refletindo-se num par de espelhos. Uma corda de violão ressoando precisa vibrar num número inteiro de meios comprimentos de onda. Da mesma maneira, espelhos de laser precisam estar distanciados de um número inteiro de meios comprimentos de onda da luz. Um dos espelhos é ligeiramente transparente, permitindo que um pouco do feixe abandone o laser a cada reflexão.

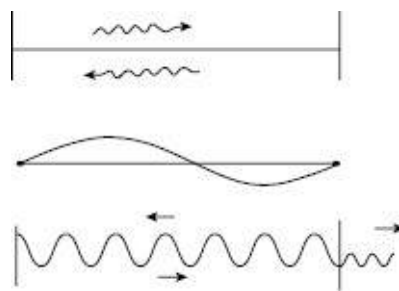



FIGURA 9.1 *No alto:* Ondas de luz refletidas de um lado a outro entre dois espelhos. *Centro:* Uma corda de violão ressoando. *Embaixo*: Uma onda de luz ressoando entre dois espelhos de laser.

Note como passamos de falar da luz como um fluxo de fótons compactos, cada um atingindo um único átomo, para a luz como uma onda espalhada que se

propaga entre dois espelhos macroscópicos. Isso é análogo ao nosso átomo, que podia estar compactamente concentrado numa caixa única ou ser uma onda espalhada pelas duas caixas. Projetistas de laser precisam pensar em ambas as formas contraditórias, mas não ao mesmo tempo.

O transístor

O transístor é seguramente a invenção mais importante do século XX. A tecnologia moderna nada seria sem ele. O transístor controla o fluxo de uma corrente elétrica. Antes de o transístor ser desenvolvido na década de 1950, tais operações eram feitas usando tubos de vácuo – válvulas elétricas. Cada válvula tinha a largura de um punho, dissipando tanto calor quanto uma lâmpada incandescente, e custava vários dólares.

Hoje, bilhões de transistores num único chip custam menos de um milionésimo de centavo cada, e cada um tem apenas milionésimos de centímetros de espessura. Um computador pessoal tem bilhões deles. Com as antigas válvulas, um computador com a potência de um laptop moderno seria ridiculamente caro, ocuparia uma área enorme e exigiria a energia elétrica da usina geradora de uma grande cidade.

Os transistores estão em toda parte: em computadores, TVs, carros, telefones celulares, fornos de micro-ondas e no seu relógio de pulso. A vida moderna continua a mudar por causa do crescente número de transistores que podem ser colocados num único chip. Em 1965, Gordon Moore, cofundador da Intel, a maior fabricante do mundo de chips semicondutores, predisse que o número de transistores que podiam ser colocados num único chip dobraria a cada dezoito meses. A "lei de Moore" provou-se excepcionalmente correta durante quatro décadas. Indo de milhares de transistores por chip nos anos 1970 a milhões nos anos 1990, agora passamos a bilhões.

Em 2009, pesquisadores foram capazes de mudar o estado de uma única molécula de benzeno aplicando a ela uma voltagem e, fazendo isso, puderam controlar a corrente que fluía através dela. A molécula única de benzeno comportou-se como os transistores macroscópicos.

Parece que estamos chegando a alguns limites físicos fundamentais em relação ao tamanho mínimo dos transistores. Pode ser que o fim da lei de Moore esteja no horizonte, embora isso já tenha sido dito antes e estivesse errado. Com a possibilidade dos computadores quânticos que discutimos abaixo, o limite do que pode ser *conseguido* num chip ainda pode estar bem além do que estimamos.

COMO OS TRANSISTORES envolvem fenômenos quânticos? A maioria dos transistores tem base de silício, cujo átomo tem catorze elétrons. Desses, dez elétrons são presos ao seu núcleo. Os outros quatro são "elétrons de valência" que ligam cada átomo de silício a seus vizinhos. Os elétrons de valência não estão presos ao núcleo, estendendo-se pelo cristal de silício. Cada elétron de valência está simultaneamente *em todo lugar* dentro do cristal.

Os elétrons diretamente envolvidos no fluxo da corrente do transístor são outra questão. Eles podem ser liberados por diferentes átomos, de fósforo, por exemplo, adicionados ao cristal de silício. Projetistas de transistores precisam preocupar-se com esses "elétrons condutores" liberados perdendo velocidade ao darem de encontro com átomos individuais de impurezas ou ficando presos por tais impurezas. Precisam tratar esses elétrons condutores como objetos compactos na escala atômica.

Como é que os engenheiros e físicos que projetam lasers e transistores lidam com fótons e elétrons que às vezes são compactos, menores que átomos, e às vezes se estendem por distâncias macroscópicas? Eles cultivam uma esquizofrenia benigna. Simplesmente aprendem quando pensar de um jeito e de outro. E, para todos os propósitos práticos, isso basta.

Dispositivos de carga acoplada (CCDs)

Os prêmios Nobel de Física geralmente são concedidos por descobertas fundamentais distantes de qualquer aplicação prática. Em 2009, porém, duas importantes façanhas tecnológicas foram contempladas: a fibra óptica e os CCDs. Cada uma delas teve grande impacto tanto na ciência quanto na economia.

Os CCDs, convertendo luz incidente em sinal elétrico, tomaram conta da fotografia pessoal e a expandiram enormemente, revolucionaram a astronomia e estão continuamente melhorando a medicina diagnóstica. Uma câmera digital típica tem um chip semicondutor com muitos milhões de CCDs.

Um CCD usado opticamente é integrado com um elemento fotoelétrico. O fenômeno que inspirou Einstein a postular o fóton em 1905 dá início ao processo num CCD. No efeito fotoelétrico original, fótons ejetam elétrons da superfície de um metal no vácuo, onde podem ser controlados por um campo elétrico. No CCD, os fótons excitam um aglomerado de elétrons em silício a estados nos quais podem ser movidos por um campo elétrico.

Um eletrodo metálico próximo recebe uma carga positiva para atrair o aglomerado de elétrons. Subsequentemente, essa carga positiva é desligada e um eletrodo vizinho é carregado positivamente para atrair esse aglomerado (à direita na figura 9.2). O processo é repetido por um sinal programado para trazer o aglomerado de elétrons aos transistores que registram a carga. O tempo de chegada de um aglomerado particular dá a posição de fótons específicos na imagem.

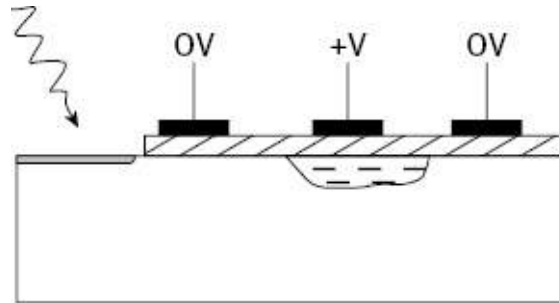



FIGURA 9.2 Diagrama esquemático de um CCD com região fotoativa à esquerda. Um grupo de elétrons sendo transportados é mostrado abaixo do eletrodo central.

Os CCDs podem detectar até mesmo um único fóton, o que lhes confere uma sensibilidade à luz muito maior que a do filme fotográfico. Além disso, uma vez que o número de elétrons excitados é diretamente proporcional ao de fótons incidentes, uma grande precisão de imagem é possível. Mais ainda, com CCDs a imagem, ou outros dados, é apresentada em forma digital, acessível a processamento ou análise.

Imagem por ressonância magnética (IRM)

A ressonância magnética produz imagens surpreendentemente claras e detalhadas de qualquer tecido do corpo que se deseje. Está a caminho de se tornar a ferramenta de diagnóstico mais importante da medicina. Atualmente, os equipamentos de IRM são grandes e caros, custando mais de 1 milhão de dólares, e um exame de IRM pode chegar a mais de mil dólares. Felizmente, tamanho e custos estão caindo, ao mesmo tempo que o potencial diagnóstico aumenta.

Uma imagem por ressonância magnética determina a distribuição de um dado elemento, geralmente hidrogênio, num material específico na região do corpo examinada. Tecidos diferentes, osso ou carne, com tumor ou normais, são retratados pelas concentrações diferentes de uma substância química particular.

Os detalhes da IRM são complicados, mas o único ponto que queremos destacar é que, como no caso do laser e do transístor, físicos e engenheiros que desenvolvem IRM precisam usar explicitamente a mecânica quântica. A ideia básica é a ressonância magnética dos núcleos atômicos. (A IRM foi originalmente chamada de "imagem por ressonância magnética *nuclear*", mas a ansiedade causada por essa última palavra fez com que fosse retirada.)

Os núcleos atômicos são pequenos ímãs com polo norte e polo sul. Num campo magnético, o núcleo de hidrogênio, que é um próton, é "quantizado espacialmente". Isso quer dizer que ele tem dois estados: num deles, seu polo norte aponta no sentido coincidente com o campo magnético; no outro, o polo norte aponta em sentido contrário ao campo. Numa máquina de IRM, uma onda eletromagnética de frequência adequada coloca os núcleos de hidrogênio que se encontram no local particular do corpo cuja imagem está sendo feita naquele instante num estado de superposição quântica, no qual os polos norte apontam

simultaneamente para cima e para baixo. Esses núcleos irradiam ondas eletromagnéticas ao retornarem ao seu estado de energia mais baixo, e a quantidade dessa radiação revela sua concentração numa região particular. É preciso então um computador para produzir a imagem a partir desses dados.

Crucial para viabilizar a IRM foi o vasto aumento de poder computacional possibilitado pelo crescente número de transistores num só chip. Quando a ideia básica da IRM foi proposta, sua importância não foi reconhecida, provavelmente porque não se antevia o poder computacional requerido. O artigo que o propunha foi assim inicialmente rejeitado pela publicação à qual foi submetido.

A maioria das máquinas de IRM consiste em um ímã supercondutor de várias toneladas, mantido a uma temperatura de poucos graus acima do zero absoluto. Num metal supercondutor, os elétrons se condensam num estado quântico no qual todos se movem como uma unidade. Cada elétron está simultaneamente em todo lugar numa enorme massa de metal. É preciso um quantum substancial de energia para remover um elétron dessa unidade interligada em movimento. Portanto, uma vez que os elétrons supercondutores recebam um impulso inicial, nenhuma energia elétrica é necessária para manter fluindo a corrente de elétrons e o campo magnético.

A IRM é possibilitada pela união dos fenômenos quânticos responsáveis pela ressonância magnética nuclear, pela supercondutividade e pelo transístor. Cada uma dessas tecnologias, bem como o laser e o CCD, levou a um prêmio Nobel de Física, sendo os mais recentes a IRM em 2004 e o CCD em 2009.

O futuro

Pontos quânticos

O envolvimento da mecânica quântica em tecnologia e biotecnologia se expande rapidamente. Em 2003, a revista *Science* considerou a pesquisa do “ponto quântico” um dos avanços científicos mais importantes do ano. Os pontos quânticos, cada um feito de algumas centenas de átomos ou menos, são estruturas artificiais com as propriedades quânticas de um único átomo, uma série de níveis de energia discretos, por exemplo. Pontos quânticos têm sido projetados para revelar o funcionamento do sistema nervoso ou como detectores ultrassensíveis de câncer de mama, ou ainda para produzir pigmentos versáteis. Quando eletrodos são ligados a pontos quânticos, podem ser usados para controlar fluxo de correntes como transistores ultrarrápidos ou para processar sinais ópticos. Em 2009, pesquisadores do Instituto Nacional de Nanotecnologia do Canadá produziram pontos quânticos de um só átomo em que um ponto podia controlar o movimento de elétrons num par de pontos vizinhos. Como isso podia ser feito em temperatura ambiente, o uso prático não deve estar muito distante. Em 2010, trabalhos com pontos quânticos indicaram que seu uso poderia aumentar a eficiência de células solares para mais de 60% a partir do limite teórico atual de 30%. Você pode esperar ouvir muita coisa sobre pontos quânticos no futuro.

Computadores quânticos

Um elemento operacional num computador clássico deve estar em um de dois estados: ou “zero” ou “1”. Um elemento “não observado” num computador quântico pode estar num estado de superposição, simultaneamente em “zero” e “1”. Essa é uma situação muito parecida com a que descrevemos, em que um único átomo não observado estava num estado de superposição, simultaneamente em cada uma de duas caixas.

Enquanto cada elemento num computador clássico pode lidar apenas com uma única operação computacional de cada vez, a superposição permite que cada elemento num computador quântico lide com muitas operações simultaneamente. Esse vasto paralelismo possibilitaria a um computador quântico solucionar em minutos certos problemas que ocupariam um computador clássico por 1 bilhão de anos. Antes, pensava-se que o tipo de operação que computadores quânticos podiam fazer bem mais depressa que os computadores clássicos fosse muito restrito, mas os limites estão se expandindo. Em particular, computadores quânticos devem ser excelentes na busca em grandes bases de dados.

Aplicações comerciais estão sendo buscadas, e resultados promissores são constantemente reportados. Mas você não poderá comprar um laptop quântico tão cedo. Computadores quânticos enfrentam sérios problemas técnicos. Como um átomo num par de caixas, as funções de onda das unidades lógicas de um computador quântico são excessivamente frágeis. Quando objetos interagem, suas funções de onda ficam “emaranhadas”, e o emaranhamento é básico para a operação de um computador quântico. As unidades lógicas do computador precisam ser adequadamente isoladas do ambiente térmico aleatório, que, de outra forma, perturbaria rapidamente os emaranhamentos *pretendidos*. É animador o desenvolvimento recente de técnicas de codificação que vêm aumentando, por um fator de cem, o tempo que os estados quânticos podem

tolerar tal perturbação. A IBM, levando a computação quântica a sério, fundou há pouco tempo um grande grupo de pesquisa para começar um projeto de cinco anos.

ENGENHEIROS E FÍSICOS que trabalham com modernas tecnologias podem lidar cotidianamente com mecânica quântica, mas não precisam enfrentar as questões levantadas pelos mistérios quânticos. Muitos nem mesmo estão cientes dessas questões. Ao ensinar mecânica quântica, os físicos, inclusive nós mesmos, dedicam pouco tempo, se é que dedicam algum, aos aspectos enigmáticos. Nós nos concentramos nos tópicos práticos que os estudantes vão precisar usar. Poderíamos também estar evitando o enigma porque nosso “esqueleto no armário” pode ser um pouco constrangedor? Nosso próximo capítulo sobre a interpretação de Copenhague da mecânica quântica apresenta a maneira padrão com que nossa disciplina deixa o enigma de lado, pelo menos para todos os propósitos práticos.

10. Maravilhosa, maravilhosa Copenhague

> Maravilhosa, maravilhosa Copenhague…
> Salgada velha dama do mar
> Um dia naveguei para longe
> Mas hoje estou de volta
> Cantando Copenhague, maravilhosa, maravilhosa
> Copenhague para mim.
>
> FRANK LOESSER, “Maravilhosa Copenhague”

O SIGNIFICADO DA MECÂNICA newtoniana era claro. Descrevia um mundo razoável, um “Universo com mecanismo de relógio”. A física clássica não necessitava de interpretação. A relatividade de Einstein seguramente é contraintuitiva, mas não precisamos de “interpretações” da relatividade. Depois de trabalhar com relatividade por algum tempo, aceitamos prontamente a ideia de que relógios em movimento se movem devagar. A afirmação da teoria quântica de que a observação *cria* a realidade observada é mais difícil de aceitar – ela precisa de interpretação.

Os estudantes entram na física para estudar o mundo físico. O *Oxford English Dictionary* define bem esse sentido de “físico”: “De ou pertencente à natureza material, *em oposição a psíquico, mental ou espiritual*” (grifo nosso). O *New York Times* citou em 2002 o historiador da ciência Jed Buchwald: “Os físicos … há muito têm uma especial aversão a admitir em seu trabalho profissional questões com o mais leve conteúdo emocional.” De fato, a maioria dos físicos procura evitar lidar com esse esqueleto que temos no armário, o encontro da física com o observador consciente. A interpretação de Copenhague da mecânica quântica permite que isso seja evitado. É a posição “ortodoxa” da nossa disciplina.

A interpretação de Copenhague

Niels Bohr reconheceu cedo que a física tinha se deparado com o observador e que o assunto tinha de ser abordado:

> A descoberta do quantum de ação não só nos mostra, de fato, a limitação natural da física clássica, como, ao lançar uma luz nova sobre o velho problema filosófico da existência objetiva de fenômenos independentemente da nossa observação, nos confronta com uma situação até agora desconhecida na ciência natural.

Menos de um ano após a equação de Schrödinger, a interpretação de Copenhague foi desenvolvida no Instituto Bohr, em Copenhague, com Niels Bohr como seu principal arquiteto. Werner Heisenberg, seu colega mais novo, foi o outro colaborador principal. Não existe uma interpretação de Copenhague "oficial". Mas toda versão agarra o touro pelos chifres e declara que uma observação *produz* a propriedade observada. A palavra capciosa aqui é "observação". Será que "observação" significa necessariamente observação *consciente*? Depende do contexto. (Quando nos referirmos especificamente a observação *consciente*, tentaremos deixar isso explícito.)

Copenhague amplia a afirmação de que a observação produz as propriedades observadas ao definir que uma observação tem lugar sempre que um objeto microscópico, de escala atômica, interage com um objeto macroscópico, de escala grande. Quando um pedaço de filme fotográfico é atingido por um fóton e assim registra onde o fóton pousou, o filme "observa" o fóton. Quando um contador Geiger estala como reação a um elétron entrando no tubo de descarga, o contador "observa" o elétron.

A interpretação de Copenhague considera portanto dois reinos: o reino clássico, macroscópico, dos nossos instrumentos de medida, governado pela física clássica; e o reino quântico, microscópico, de átomos e outras coisas pequenas, governado pela equação de Schrödinger. A interpretação argumenta

que jamais lidamos *diretamente* com objetos quânticos do reino microscópico. Logo, não precisamos nos preocupar com sua realidade física – ou a falta dela. Uma “existência” que permite calcular seus efeitos sobre nossos instrumentos macroscópicos é perfeitamente suficiente. Afinal, o que registramos é apenas o comportamento desses equipamentos clássicos. Como a diferença de escala entre átomos e contadores Geiger é tão grande, Copenhague trata os reinos microscópico e macroscópico separadamente.

Frequentemente falamos do comportamento de elétrons, átomos e outros objetos microscópicos como se os observássemos diretamente, como se fossem reais como bolinhas de gude. (Podemos, por exemplo, dizer: “Uma partícula alfa ricocheteou num núcleo de ouro.”) Não obstante, é apenas a resposta dos nossos instrumentos de laboratório que precisamos considerar real.

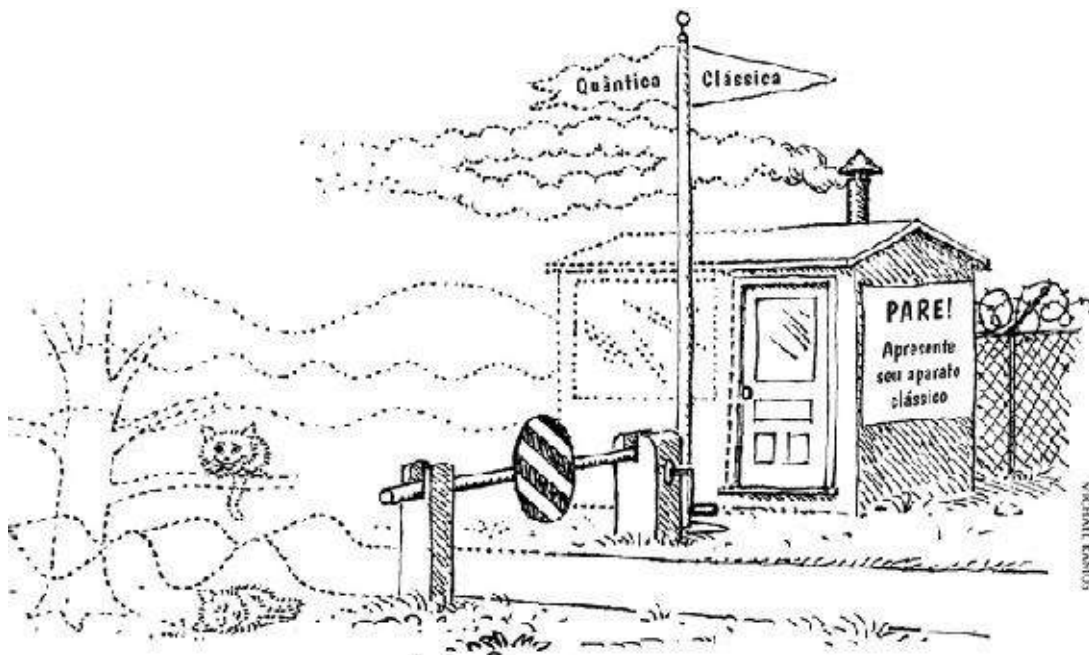



FIGURA 10.1 Desenho de Michael Ramus, 1991. © Instituto Americano de Física.

Em 1932, apenas alguns anos depois da interpretação de Copenhague de Bohr, John von Neumann apresentou um tratamento rigoroso ao qual também nos referimos como interpretação de Copenhague. Ele demonstrou que se a mecânica quântica se aplica universalmente – como se afirma – em *última*

instância é inevitável um encontro com a consciência. No entanto, Von Neumann demonstrou que, para todos os propósitos *práticos*, podemos considerar equipamentos macroscópicos de maneira clássica. Isso enfatiza que a separação de Bohr entre o microscópico e o macroscópico é apenas uma aproximação muito boa. Discutiremos a conclusão de Von Neumann no capítulo 17. Ela alerta que, sempre que nos referimos a “observação”, a questão da consciência está espreitando, escondida.

A maioria dos físicos, desejando evitar problemas filosóficos, aceita prontamente a versão de Bohr da interpretação de Copenhague. Nós, físicos, podemos ocasionalmente navegar rumo a margens especulativas, mas, quando realmente *fazemos* física ou ensinamos física, todos voltamos para casa, para a maravilhosa Copenhague.

Os físicos de hoje mostram mais desconforto com os átomos serem menos que reais, à medida que a tecnologia invade o mal definido território entre os reinos clássico e quântico. Portanto, exploraremos criticamente a interpretação de Copenhague, a posição tacitamente aceita dos físicos em atividade.

O que Copenhague precisa tornar aceitável

Embora tenhamos apresentado no capítulo 8 o "esqueleto no armário" da física em forma de uma história, versões reais daqueles experimentos são feitas o tempo todo. Mostramos esses resultados contraditórios (usando fótons ou elétrons) até como demonstrações de aula.

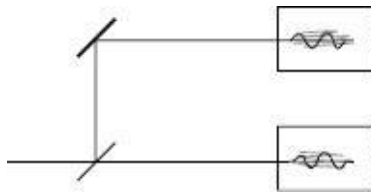



FIGURA 10.2 A demonstração "átomos num par de caixas".

Na história do capítulo 8, um objeto pequeno é enviado para dentro de um par de caixas bem separadas. Olhando dentro das caixas, você sempre acha o objeto inteiro numa *única* caixa, e a outra caixa vazia. Segundo a teoria quântica, porém, antes de ser observado, o objeto estava simultaneamente em *ambas* as caixas, *não* inteiramente numa caixa só. Um experimento de interferência, que você poderia ter escolhido, estabeleceria esse fato. Logo, pela sua livre escolha, você poderia demonstrar qualquer uma das duas realidades anteriores contraditórias. Mesmo que a tecnologia atual limite a exibição de fenômenos quânticos a coisas muito pequenas, a teoria quântica presumivelmente se aplica a tudo – de bolas de beisebol a átomos. Copenhague precisa tornar essa estranheza aceitável.

Três pilares de Copenhague

A interpretação de Copenhague repousa sobre três ideias básicas: a interpretação probabilística da função de onda, o princípio da incerteza de Heisenberg e a complementaridade. Vamos examinar uma de cada vez.

A interpretação probabilística da função de onda

Estamos usando todo este tempo a ideia de que a ondulatoriedade numa região (tecnicamente, o quadrado absoluto da função de onda) é a probabilidade de que o objeto seja encontrado nessa região. Essa interpretação probabilística da ondulatoriedade é central para a interpretação de Copenhague.

Enquanto a física clássica é estritamente determinista, a mecânica quântica fala de uma aleatoriedade intrínseca à natureza. No nível atômico, Deus joga dados, não importa a opinião de Einstein. (Einstein enfatizava repetidamente que a realidade criada pelo observador, e não a aleatoriedade, era o seu real problema com a teoria quântica.) Não é difícil aceitar que a natureza seja, em última instância, estatística. Afinal, muito do que acontece na vida cotidiana é aleatório. Fosse essa toda a história, haveria muito menos preocupação com um "enigma quântico". A probabilidade em mecânica quântica implica algo mais que aleatoriedade.

A probabilidade clássica no jogo das cascas de noz, digamos, é a probabilidade *subjetiva* (para você) de onde está o feijão. Mas há também um feijão real sob alguma das cascas de noz. A probabilidade quântica *não* é a probabilidade de onde o átomo *está*. É a probabilidade objetiva de onde você (ou qualquer pessoa) poderá *encontrá-lo*. O átomo não estava em certo lugar até ser *observado* lá.

Como a teoria quântica não tem nenhum átomo além da função de onda do átomo, se a função de onda do átomo ocupa duas caixas, o átomo em si está simultaneamente em ambas as caixas. Sua observação posterior numa única caixa *faz com que* ele esteja *inteiramente* nessa caixa (ou *não* esteja nessa caixa).

A ideia do parágrafo anterior é difícil de aceitar. É por isso que a repetimos insistentemente. Mesmo estudantes que completam um curso de mecânica quântica, quando indagados sobre o que a função de onda representa, frequentemente respondem incorretamente que ela fornece a probabilidade de o objeto *estar* num lugar particular. Errado. A função de onda dá a probabilidade de *encontrar* o objeto num lugar particular. O texto a partir do qual lecionamos (de Griffiths, e listado nas "Leituras sugeridas") enfatiza a ideia correta citando Pascual Jordan, um dos fundadores da teoria quântica: "Observações não só *perturbam* o que está sendo medido; elas o *produzem*." Mas somos solidários com nossos alunos. Calcular funções de onda já é difícil o bastante sem ter de se preocupar com seu significado mais profundo.

EMBORA VENHAMOS FALANDO de "observação", não dissemos realmente o que constitui uma observação. Em última análise é uma questão controversa. Mas há casos muito nítidos.

Para um fóton ricocheteando num átomo, existe uma resposta clara: o fóton *não* observa o átomo. Após o encontro, o fóton e o átomo estão juntos num estado de superposição que inclui todas as posições possíveis do fóton e do átomo. Isso pode ser confirmado com um complexo experimento de interferência de dois corpos. No outro extremo, quando ouvimos o clique de um contador Geiger em contato com o resto do mundo registrando esse fóton, foi feita uma observação da posição do fóton e portanto do átomo.

As situações intermediárias é que são controversas. Falando estritamente, é claro, o contador Geiger precisa obedecer à mecânica quântica. Se estivesse isolado do resto do mundo, simplesmente se juntaria ao estado de superposição do objeto microscópico que o atingiu. Portanto, ele não "observaria". Mas, por

razões práticas, é essencialmente impossível demonstrar que um objeto grande está em estado de superposição, porque é essencialmente impossível isolar um objeto grande do resto do mundo. Falaremos mais sobre essa dificuldade no próximo capítulo.

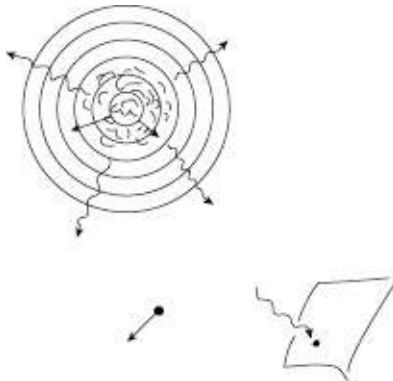



FIGURA 10.3 O ricochetear de um fóton num átomo não cria a posição do átomo até que o fóton seja detectado.

SEJAMOS CUIDADOSOS EM relação ao que significa ser "não observado". Considere nosso átomo em seu par de caixas. Até que a posição do átomo numa caixa específica seja observada, o átomo não existe numa caixa *específica*. Não obstante, "observamos" inicialmente o átomo quando o pegamos e o mandamos para um par de caixas. A posição do átomo no *par* de caixas é portanto uma realidade observada. No entanto, tomando o caso extremo de caixas muito grandes, podemos simplesmente dizer que o átomo não tem posição nenhuma. Ele *não tem* a propriedade de posição. O mesmo argumento pode ser dado para qualquer outra propriedade de um objeto.

A interpretação de Copenhague geralmente adota o ponto de vista de que existem somente as propriedades *observadas* dos objetos microscópicos. John Wheeler afirmou concisamente: "Nenhuma propriedade microscópica é uma propriedade até que seja uma propriedade observada."

Se levarmos isso à sua conclusão lógica, os objetos microscópicos em si não são coisas reais. Eis o que diz Heisenberg sobre isso:

> Nos experimentos sobre eventos atômicos que temos de fazer com coisas e fatos, os fenômenos são tão reais quanto qualquer fenômeno da vida cotidiana. *Mas os átomos ou partículas elementares em si não são reais*; eles formam um mundo de potencialidades ou possibilidades em vez de um mundo de coisas ou fatos [grifo nosso].

De acordo com essa visão, objetos de escala atômica só existem em algum reino abstrato, não no mundo físico. Se é assim, tudo bem que não "façam sentido". É suficiente que eles afetem nossos instrumentos de medição segundo a teoria quântica. Coisas grandes, por outro lado, são reais, para todos os propósitos práticos. É claro que sua descrição clássica é apenas uma *aproximação* das leis quânticas corretas da física. Sendo assim, em algum sentido, o reino microscópico, o reino *não observado*, é o mais real. Platão teria adorado.

SE O REINO MICROSCÓPICO consiste meramente em possibilidades, como é que a física explica as coisas pequenas das quais as coisas grandes são feitas? O enunciado mais famoso é frequentemente atribuído a Bohr:

> Não existe mundo quântico. Existe apenas uma descrição quântica abstrata. É errado pensar que a tarefa da física é descobrir como a natureza é. A física diz respeito ao que podemos *dizer* sobre a natureza.

Na verdade, essa é provavelmente uma síntese do pensamento de Bohr feita por um de seus colegas. Mas ela se ajusta àquilo que Bohr disse de maneiras mais complicadas. A interpretação de Copenhague evita envolver a física com o observador consciente redefinindo o que tem sido a meta da ciência desde a Grécia antiga: explicar o mundo real.

Einstein rejeitou a atitude de Bohr como derrotista, dizendo ter chegado à física para descobrir o que realmente acontece, aprender "os pensamentos de Deus". Schrödinger rejeitou a interpretação de Copenhague nos termos mais amplos:

> A posição de Bohr, de que uma descrição espaçotemporal [onde um objeto *está* num dado momento] é impossível, eu rejeito já de início. A física não consiste somente em pesquisa atômica, a ciência não consiste somente em física e a vida não consiste apenas em ciência. O objetivo da pesquisa atômica é adequar o conhecimento empírico referente a ela a nosso outro pensamento. Todo esse pensar, no que

> concerne ao mundo exterior, é ativo no espaço e no tempo. Se não puder ser encaixado no espaço e no tempo, então fracassa em seu objetivo, e não se sabe realmente a que propósito serve.

Será que Bohr de fato negaria que um objetivo da ciência é explicar o mundo natural? Talvez não. Certa vez ele disse: “O contrário de uma afirmação correta é uma afirmação incorreta, mas o contrário de uma grande verdade pode ser outra grande verdade.” O pensamento de Bohr é notoriamente difícil de apreender.

UM COLEGA DE HEISENBERG sugeriu certa vez que o problema onda-partícula é meramente semântico e poderia ser resolvido não chamando os elétrons nem de ondas nem de partículas, e sim de “ondículas”. Heisenberg, insistindo que as questões filosóficas levantadas pela mecânica quântica incluíam o grande tanto quanto o pequeno, replicou:

> Não, essa solução é um pouco simples demais para mim. Afinal, não estamos lidando com uma propriedade especial dos elétrons, mas com uma propriedade de toda a matéria e de toda a radiação. Quer peguemos elétrons, quanta de luz, moléculas de benzol *ou pedras*, sempre iremos nos deparar com essas duas características, a corpuscular e a ondulatória [grifo nosso].

Ele está nos dizendo que, em princípio (e é isso que é importante para nós aqui), *tudo* é mecânico-quântico e, em última análise, sujeito ao enigma. Isso nos leva ao segundo pilar da interpretação de Copenhague, o princípio da incerteza, a ideia pela qual Heisenberg é mais conhecido.

O princípio da incerteza de Heisenberg

Heisenberg mostrou que qualquer demonstração para refutar a alegação da realidade criada pelo observador seria frustrada. Eis um exemplo:

Ao fazer um experimento de interferência, olhe para ver de que caixa cada átomo *realmente* veio. Ver que o átomo *veio* de uma caixa *única* demonstraria que o átomo de fato *estava* realmente naquela caixa única. Se ele seguisse a regra de interferência, a qual implica que saiu das *duas* caixas, a teoria quântica se revelaria inconsistente, e portanto errada. Para mostrar que tal demonstração

devia fracassar, Heisenberg criou o experimento mental que hoje é chamado de “microscópio de Heisenberg”.

Para ver de que caixa o átomo saiu, você poderia fazer incidir luz sobre ele. Refletir a luz em algo é nosso modo habitual de ver as coisas. Para não “chutar” o átomo com força demais e desviá-lo de seguir unicamente rumo a um local permitido pelo padrão de interferência, vamos atingi-lo com a maior delicadeza, usando o mínimo de luz possível, um único fóton.

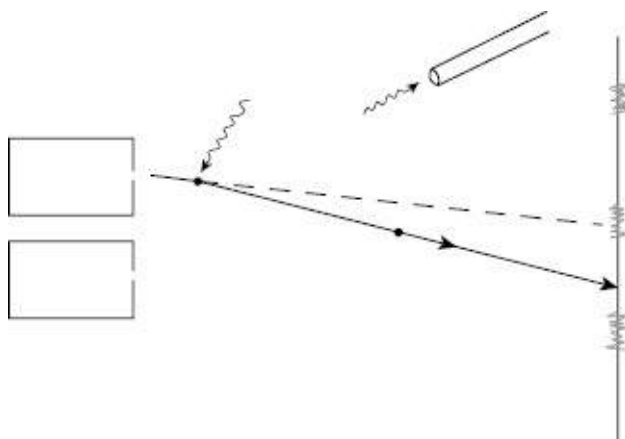



FIGURA 10.4 O microscópio de Heisenberg.

Em geral, se duas coisas estão mais próximas que o comprimento de onda das ondas provenientes delas, sua separação não pode ser estabelecida. Isso é ilustrado na figura 10.5. Na figura 10.5 A, o comprimento de onda, a distância entre as cristas, é menor que a separação das fontes de ondas. As cristas chegando ao “olho” que observa estão vindo claramente de duas direções diferentes, dois lugares diferentes. Na figura 10.5 B, o comprimento de onda é maior que a separação das fontes de ondas. As cristas chegando ao “olho” que observa *não* são claramente distinguíveis como vindo de duas direções diferentes, dois lugares diferentes. Portanto, para saber de que caixa o átomo veio, o comprimento de onda da luz refletida do átomo precisa ser menor, mais curto, que a separação entre as caixas.

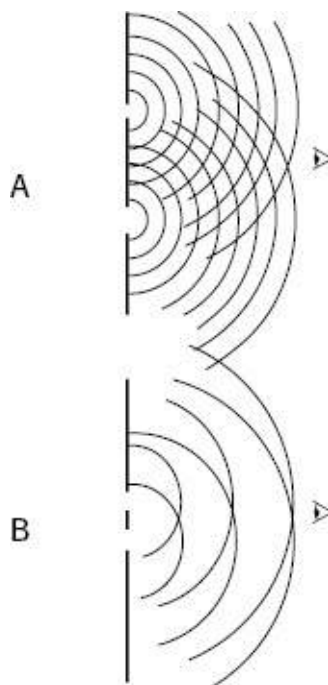



FIGURA 10.5 A. Fontes de ondas separadas por mais de um comprimento de onda. B. Fontes de ondas separadas por menos de um comprimento de onda.

Mas um comprimento de onda pequeno significa um grande número de cristas chegando por segundo. Essa é uma frequência alta, e um fóton de alta frequência tem alta energia. Ele daria um "chute" forte no átomo. Heisenberg calculou com facilidade que um fóton com comprimento de onda suficientemente pequeno para *distinguir* as duas fontes chutaria o átomo com força bastante para borrar qualquer padrão de interferência. E faria com que os átomos fossem para lugares proibidos pela regra da interferência. A linha tracejada na figura 10.4 mostra a trajetória que o átomo teria percorrido se *não* fosse atingido pelo fóton.

A história do microscópio de Heisenberg mostra que, se você viu cada átomo vindo de uma caixa única específica, não poderia *ver também* um padrão de interferência que mostrasse que cada átomo havia estado em ambas as caixas. Portanto, nesse caso, não poderia refutar a criação da realidade pelo observador. Heisenberg levou orgulhosamente essa descoberta a Bohr. Bohr ficou impressionado, mas disse a seu jovem colega que ele não estava totalmente correto. Heisenberg esqueceu que, se você soubesse o ângulo de ricocheteio do

fóton, *poderia* na verdade *calcular* de que caixa o átomo viera. Mas a ideia básica estava certa. Bohr lhe mostrou que, incluindo o tamanho da lente do microscópio necessária para medir o ângulo do fóton em sua análise, ele podia conseguir de novo o resultado que julgava ter obtido. Não ter levado esse ponto em consideração deixou Heisenberg duplamente envergonhado – ele relatou que determinar a direção de uma onda de luz com um microscópio fora uma questão que havia errado no seu exame de doutorado.

Heisenberg foi adiante, generalizando sua história do microscópio, que veio a se tornar o "princípio da incerteza de Heisenberg". Quanto maior a precisão com que se mede a posição de um objeto, mais incerteza se terá sobre sua velocidade. E vice-versa – quanto maior a precisão com que se mede a velocidade de um objeto, mais incerteza se terá sobre sua posição.

O princípio da incerteza também pode ser deduzido diretamente da equação de Schrödinger. Na verdade, a observação de qualquer propriedade torna incerta uma grandeza "complementar". Por exemplo, posição e velocidade (ou momento) são grandezas complementares. Energia e tempo de observação são outro par complementar. O importante aqui é que a observação de qualquer propriedade perturba as coisas o suficiente para impedir a refutação da afirmação da teoria quântica de que a observação *cria* a propriedade observada.

OBSERVAMOS DE PASSAGEM que o princípio da incerteza surge em algumas discussões sobre livre-arbítrio. Na visão de mundo da física clássica, se um "olho que tudo vê" conhecesse a posição e a velocidade de todo objeto no Universo num dado momento, o futuro inteiro poderia ser previsto com certeza. Como somos parte desse Universo físico, a física clássica exclui o livre-arbítrio. Uma vez que o princípio da incerteza nega esse determinismo newtoniano, ele tem estimulado discussões filosóficas sobre determinismo e livre-arbítrio. A incerteza pode *permitir* o livre-arbítrio negando o determinismo, mas a aleatoriedade, quântica ou não, não é uma livre escolha. A incerteza quântica não pode *estabelecer* o livre-arbítrio.

A complementaridade

Embora o princípio da incerteza mostre que qualquer observação de um objeto necessariamente perturba esse objeto o suficiente para impedir uma demonstração de que a teoria quântica é falsa, isso não basta. Também precisamos do terceiro pilar da interpretação de Copenhague: a complementaridade. Esta é difícil de aceitar. (Complementaridade é o que realmente incomodava Einstein, não a aleatoriedade do seu jogo de dados.)

Considere um conjunto de mil pares de caixas, cada par com um átomo em estado de superposição simultaneamente em ambas as caixas. Espie dentro de uma caixa de cada par. Cerca de metade das vezes você verá um átomo na caixa que abriu. Segundo o princípio da incerteza, ver o átomo perturbou-o com os fótons que você fez incidir sobre ele. Portanto, jogue fora todos os pares de caixas nas quais viu, e portanto perturbou, um átomo. Você fica com cerca de quinhentos pares de caixas cujos átomos *não* foram fisicamente perturbados; nenhum fóton incidiu sobre eles. A caixa em que você olhou estava completamente vazia. Mas, para esses pares de caixas, você *sabe* em que caixa cada átomo está: na caixa em que você *não* olhou.

Tente um experimento de interferência com esses quinhentos pares de caixas. Um padrão de interferência provaria que cada um desses átomos estava simultaneamente em *ambas* as caixas do par. Mas, para esses pares de caixas, você já tinha determinado que cada átomo estava inteiramente numa caixa *única*. Achar um padrão de interferência mostraria portanto uma inconsistência na teoria quântica.

Na verdade, esses átomos supostamente não perturbados *não* produzem um padrão de interferência. O que fez com que esses átomos não perturbados adotassem um comportamento diferente? Afinal, se você tivesse feito um experimento de interferência antes de espiar dentro das caixas vazias, esses átomos teriam produzido um padrão de interferência.

Embora esses átomos não tenham sido fisicamente perturbados, você determinou em que caixa cada átomo estava. Aparentemente, sua aquisição do

conhecimento foi suficiente para concentrar cada átomo totalmente dentro de uma caixa única. Para evitar ver isso como algo de certa forma misterioso é necessário conversar um pouco sobre o assunto.

A conversa que propomos numa aula de mecânica quântica para estudantes de física é que, quando olhamos dentro de uma caixa e não encontramos nenhum átomo, fazemos colapsar instantaneamente a ondulatoriedade do átomo na outra caixa. No jogo das cascas de noz, nosso ato de olhar faz colapsar a probabilidade, que era de ½ de o feijão estar em cada caixa, para zero na caixa que descobrimos vazia e 1, certeza, para o feijão estar na outra caixa. A mesma coisa acontece com a ondulatoriedade. Afinal, ondulatoriedade é probabilidade.

Essa explicação é um pouco verborrágica. A probabilidade clássica *começa* simplesmente como uma medida do conhecimento da pessoa. Por outro lado, a probabilidade quântica, a ondulatoriedade, é supostamente tudo o que existe para o átomo físico. Como o simples ato de adquirir conhecimento concentra o átomo numa caixa única? Mas raramente enfatizamos charadas filosóficas para estudantes de física, que precisam antes de tudo aprender a calcular.

BOHR PERCEBEU QUE precisava confrontar a influência do conhecimento dos fenômenos físicos para permitir que os físicos continuassem a fazer física sem ficar atolados em filosofia. Assim, enunciou seu princípio da complementaridade. Os dois aspectos de um objeto microscópico, seu aspecto de partícula e seu aspecto de onda, são "complementares". Uma descrição *completa* requer ambos os aspectos contraditórios. Mas devemos *considerar apenas um aspecto de cada vez*, especificando o tipo de observação que estamos fazendo, o experimento que estamos realizando.

Consequentemente, evitamos a aparente contradição considerando o sistema microscópico, o átomo, como não existente em si e por si. Devemos sempre incluir na nossa discussão – ao menos implicitamente – os diferentes equipamentos experimentais macroscópicos usados para exibir cada um dos dois aspectos complementares. Tudo então fica bem, porque em última análise é

apenas o comportamento clássico de tal equipamento que relatamos. Nas palavras de Bohr:

> O ponto decisivo é reconhecer que a descrição do arranjo experimental e o registro das observações devem ser feitos em linguagem clara, adequadamente refinada pela terminologia física usual. Essa é uma exigência lógica simples, uma vez que pela palavra "experimento" podemos apenas nos referir a um procedimento com referência ao qual somos capazes de comunicar a outros o que fizemos e o que descobrimos.
>
> Em arranjos experimentais reais, o preenchimento de tais exigências é assegurado pelo uso, como instrumentos de medição, de corpos rígidos suficientemente pesados para permitir uma informação totalmente clássica de suas posições e velocidades relativas.

Em outras palavras, embora os físicos falem de átomos e outras entidades microscópicas como se fossem coisas físicas reais, as coisas microscópicas são apenas conceitos que usamos para descrever o comportamento dos nossos instrumentos de medição. Não precisamos ir além da descrição desse comportamento ao lidar com o mundo microscópico.

Essa postura faz lembrar a "*Hypotheses non fingo*" (Não faço hipóteses) de Newton, sua alegação de que uma explicação da gravidade não precisa ir além das equações que preveem os movimentos dos planetas. Einstein, é claro, com a relatividade geral, sua teoria da gravidade, forneceu grande compreensão da natureza do espaço e do tempo, indo além das equações de Newton.

AQUI TEMOS UMA conduta relacionada que a interpretação de Copenhague flexível pode adotar: não pense nos experimentos que *poderiam* ter sido feitos, mas *na verdade* não foram. Afinal, foi só a percepção de que *poderíamos* ter escolhido fazer um experimento diferente do que realmente fizemos que deu origem ao problema da medição quântica, ao enigma quântico.

Um físico eminente enfatizou essa postura proclamando: "Experimentos não feitos não têm resultados!" Como a física lida com *resultados* experimentais, não precisamos nem pensar sobre experimentos *não* feitos. Na realidade, você não poderia *mostrar* uma contradição lógica. (Um experimento "qual caixa?" perturba *esses* átomos o suficiente para impedir um experimento de interferência

com eles, e após um experimento de interferência você não pode fazer um experimento “qual caixa?” com esses *mesmos* átomos.)

Nossa premissa habitual de que poderíamos ter feito uma coisa diferente do que realmente fizemos é chamada de “determinação contrafactual”. Acreditar que *se* você não almoçasse estaria faminto pressupõe determinação contrafactual. Colocamos alguém na cadeia porque *poderia* ter decidido não puxar o gatilho. Administramos nossa vida e a sociedade pressupondo a determinação contrafactual que essa versão de Copenhague nega. Alguns físicos com inclinação matemática argumentam que a mecânica quântica nos força a simplesmente aceitar uma negação da determinação contrafactual. Isso pode não ser um problema se simplesmente aplicarmos a teoria quântica a coisas microscópicas e não nos preocuparmos com suas inegáveis implicações mais amplas.

Negando a determinação contrafactual, a interpretação de Copenhague pareceria estar negando o livre-arbítrio. Será que o livre-arbítrio é uma ilusão? Não podemos provar que não somos apenas autômatos num mundo totalmente determinista que conspira para nos iludir e nos levar a acreditar que fazemos escolhas. No entanto, nós (Fred e Bruce) somos ambos totalmente confiantes no nosso *próprio* livre-arbítrio, mesmo que nenhum de nós possa ter certeza *absoluta* de que seu coautor não seja um sofisticado robô.

A aceitação de – e o desconforto com – Copenhague

A interpretação de Copenhague nos pede para aceitar a mecânica quântica pragmaticamente. (Adesivo resumindo o pragmatismo: “Se funciona, é verdade.”) Quando os físicos querem evitar lidar com filosofia, e para a maioria de nós isso é quase o tempo todo, aceitamos tacitamente a interpretação de Copenhague. Os físicos tendem a ser pragmáticos.

Embora, estritamente falando, as propriedades de objetos microscópicos sejam meramente *inferidas* a partir do comportamento do nosso equipamento, mesmo assim os físicos falam de objetos microscópicos, os visualizam e fazem cálculos com modelos deles como se fossem reais. Mas, quando confrontados com o paradoxo, podemos sempre recuar para a interpretação de Copenhague: a teoria quântica de objetos microscópicos deve explicar o comportamento sensato do nosso equipamento macroscópico, mas os objetos microscópicos em si não precisam “fazer sentido”.

Consideremos uma analogia tirada da psicologia (como fez Bohr). Basicamente, relatamos o comportamento de uma pessoa. O comportamento *físico* em si não apresenta paradoxo. Os movimentos físicos da pessoa fazem sentido na medida em que estão de acordo com a lei do movimento de Newton. Os *motivos* da pessoa, porém, são *teorias* que devem explicar seu comportamento. Mas os motivos em si não precisam fazer, e muitas vezes não fazem, sentido. Pragmaticamente aceitamos esse posicionamento ao lidar com gente. A interpretação de Copenhague nos pede que aceitemos essa postura ao lidar com fenômenos físicos microscópicos.

Se você não se sente confortável com a solução de Copenhague para o problema do observador, não está sozinho. Não conhecemos ninguém que compreenda e leve a sério o que a mecânica quântica nos diz sem admitir perplexidade.

Não obstante, até recentemente, a maioria dos livros-texto de mecânica quântica deixavam implícito que Copenhague resolvia todos os problemas. Um texto de 1980 desprezava o enigma com uma piada, o desenho de um ornitorrinco com a legenda: “O análogo clássico do elétron.” A ideia era que, ao entrar no reino do pequeno, você não devia se surpreender mais com um objeto sendo ao mesmo tempo uma onda espalhada e uma partícula compacta do que os zoólogos que vão à Austrália com um animal que é ao mesmo tempo mamífero e um “pato” ovíparo. No seu prefácio, outro autor dos anos 1980 promete “tornar a mecânica quântica menos misteriosa para o estudante”. Ele o faz jamais mostrando o mistério.

Tais atitudes provavelmente estimularam o comentário de Murray Gell-Mann em seu discurso de aceitação do prêmio Nobel de Física de 1969, dizendo que Niels Bohr fez lavagem cerebral em gerações de físicos, levando-os a acreditar que o problema fora solucionado. A preocupação de Gell-Mann é hoje um pouco menos relevante, uma vez que a maioria dos textos correntes sobre mecânica quântica ao menos insinua questões não resolvidas.

ESSENCIAL PARA A INTERPRETAÇÃO de Copenhague era a clara separação entre o microcosmo quântico e o macrocosmo clássico. Essa separação dependia da vasta diferença de escala entre os átomos e as coisas grandes com que lidamos diretamente. No tempo de Bohr, havia uma larga terra de ninguém intermediária. Parecia aceitável pensar no reino macro obedecendo à física clássica e no reino micro obedecendo à física quântica.

No entanto, a tecnologia de hoje invadiu essa terra de ninguém. Com luz laser apropriada podemos ver átomos individuais a olho nu da mesma maneira que vemos grãos de poeira num raio de sol. Com o microscópio de tunelamento com varredura, não só podemos ver átomos individuais, mas podemos pegá-los e colocá-los de volta no lugar. Físicos escreveram o nome da empresa em que trabalham posicionando 35 átomos de argônio.

A mecânica quântica é aplicada a objetos cada vez maiores. Discutiremos adiante fenômenos quânticos recentemente demonstrados com objetos quase macroscópicos, na verdade visíveis. Cosmólogos escrevem uma função de onda para todo o Universo para estudar o Big Bang. Hoje é cada vez mais difícil aceitar com indiferença o reino em que as regras quânticas se aplicam como se não fosse fisicamente real.

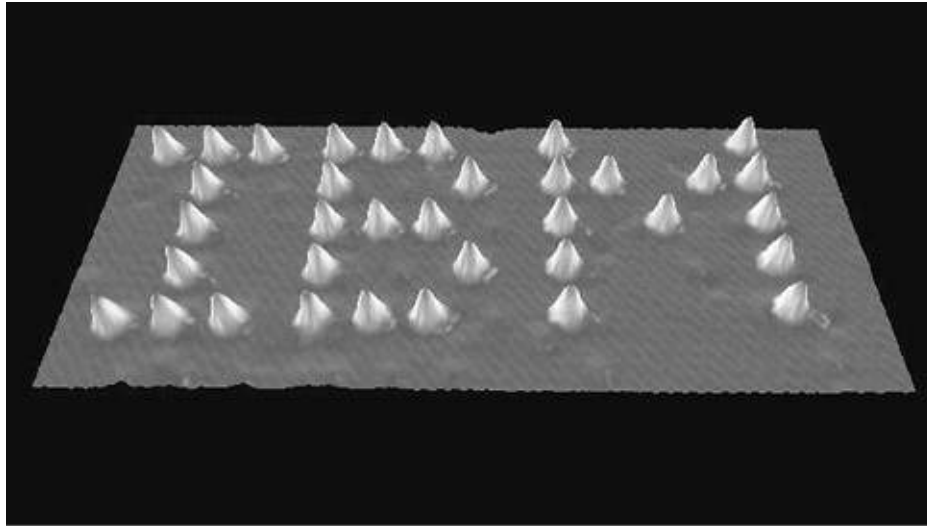



FIGURA 10.6 Trinta e cinco átomos de argônio. Cortesia IBM.

Entretanto, muitos físicos, quando pressionados a responder à estranha natureza do microcosmo, podem dizer algo do tipo: "É simplesmente assim que a natureza é. A realidade não é aquilo que você intuitivamente pensa ser. A mecânica quântica nos força a abandonar o realismo ingênuo." E a resposta fica por aí. Todo mundo está disposto a abandonar o realismo *ingênuo*. Mas poucos físicos estão dispostos a abandonar o "realismo *científico*", definido como "a tese de que os objetos do conhecimento científico existem e agem independentemente do conhecimento que temos deles." A mecânica quântica desafia o realismo científico.

AO MESMO TEMPO QUE poucos físicos negam a estranheza quântica, a maioria provavelmente considera que a interpretação de Copenhague, ou sua extensão moderna, a "decoerência" (discutida no capítulo 15), já lidou com ela. Para todos

os propósitos *práticos*, é isso o que conta. Porém mais físicos, especialmente físicos mais jovens, estão com a mente cada vez mais aberta para ideias que vão além de Copenhague. Proliferam interpretações que questionam Copenhague. No capítulo 15 discutimos algumas delas. A preocupação com a consciência em si (bem como sua ligação com a mecânica quântica) tem emergido mais e mais entre físicos, filósofos e psicólogos.

A interpretação de Copenhague foi recentemente resumida como: “Cale a boca e calcule!” É uma síntese rude, mas não totalmente injusta. Ela é, na verdade, a injunção certa para a maioria dos físicos durante a maior parte do tempo. A interpretação de Copenhague é seguramente a maneira maravilhosa de lidar com a mecânica quântica para todos os propósitos *práticos*. Ela nos assegura que em nossos laboratórios ou nossas escrivaninhas possamos usar a mecânica quântica sem nos preocupar com o que está “realmente” se passando.

Poderíamos, no entanto, desejar mais que um algoritmo para calcular probabilidades. A física clássica forneceu mais; proporcionou uma visão de mundo que mudou nossa cultura. Trata-se, obviamente, de uma visão de mundo que agora sabemos ser fundamentalmente falha. Será possível que haja por aí em nosso futuro algum impacto quântico em nossa visão de mundo?

Uma síntese de Copenhague

= Opositor

= Copenhaguista

A mecânica quântica viola o *senso comum*. Deve haver algo de *errado* com ela!

Não. Nunca houve uma previsão errada. Ela funciona perfeitamente.

Quanto melhor funciona, mais tola parece! Ela não é logicamente consistente.

Oh, você sabe que Einstein *tentou* mostrar isso. E desistiu.

Mas a mecânica quântica diz que coisas pequenas não têm propriedades próprias, que eu na realidade crio o que vejo pelo fato de *olhar*.

Verdade. Você percebe claramente a ideia básica.

Mas, tendo apenas propriedades criadas pelo observador, as coisas pequenas não têm *realidade* física. São reais apenas quando estão sendo observadas. Isso não faz sentido!

Não se preocupe com "realidade" ou "fazer sentido". Coisas pequenas são apenas modelos. Modelos não precisam fazer sentido. Modelos precisam apenas funcionar. Coisas grandes são reais o bastante. Então está tudo bem.

Mas uma coisa grande é simplesmente um *conjunto* de coisas pequenas, de átomos. Para ser consistente, a mecânica quântica teria de dizer que *nada* tem realidade até ser observado.

Ah, é verdade, se você insiste. Mas não tem importância.

Não tem importância?! Se a mecânica quântica diz que o meu gato e a minha mesa não são reais até que *se olhe* para eles, está dizendo algo *doido*.

Não, está tudo bem. Na verdade você nunca *vê* nenhuma *doidice* com coisas grandes. Para todos os propósitos práticos, coisas grandes estão *sempre* sendo olhadas.

Para todos os propósitos *práticos*, é claro. Mas qual é o *significado* dessa realidade criada pelo observador?

A ciência não fornece significados. A ciência simplesmente nos diz o que acontecerá. Simplesmente prediz o que será observado.

Eu quero mais que uma receita para fazer previsões. Se você diz que o senso comum está errado, quero saber o que está certo.

Mas nós concordamos que a mecânica quântica está certa. A equação de Schrödinger diz tudo o que acontecerá, tudo o que pode ser observado.

Eu quero saber o que está realmente acontecendo, eu quero saber a história toda!

A descrição da mecânica quântica é a história toda. Não há mais nada para se contar.

Droga! Há um mundo real aí fora. Eu quero saber a verdade sobre a natureza.

A ciência não pode revelar nenhum mundo real aí fora além do que é observado. Qualquer outra coisa é só filosofia. *Essa* é a "verdade" – já que você precisa de uma.

Isso é derrotismo! Nunca vou me satisfazer com uma resposta tão superficial. Você está fazendo a ciência abandonar sua meta filosófica básica, sua missão de explicar o mundo físico.

É uma pena. Mas não venha me incomodar com filosofia. Tenho *trabalho* científico para fazer.

A mecânica quântica é manifestamente absurda! Não vou aceitá-la como resposta final.

(ELA NÃO ESTÁ MAIS ESCUTANDO.)

11. O controverso gato de Schrödinger

O sistema inteiro [conteria] partes iguais de um gato vivo e morto.

ERWIN SCHRÖDINGER

Quando ouço falar no gato de Schrödinger, eu pego meu revólver.

STEPHEN HAWKING

EM 1935, a forma básica da teoria quântica estava clara. A equação de Schrödinger era a nova equação universal do movimento. Embora fosse *requerida* apenas para objetos de escala atômica, a teoria quântica presumivelmente governava o comportamento de *tudo*. A física anterior, a essa altura chamada "clássica", era uma aproximação mais fácil de usar para coisas grandes.

Falamos sobre a história que Schrödinger inventou para mostrar que a teoria quântica não é só estranha, é absurda. No entanto, essa teoria funciona tão bem que os físicos desconsideram o absurdo. Ainda assim, nos dias de hoje a história de Schrödinger ressoa alto.

A seguir, quando falarmos de "teoria quântica", estaremos nos referindo à interpretação de Copenhague a menos que explicitemos outra coisa. Sob esse aspecto, Heisenberg nos diz que objetos microscópicos como átomos não são "reais" – são apenas "potencialidades". Mas e as coisas *feitas* de átomos? Cadeiras, por exemplo? Será que uma galáxia ainda não vista não está realmente lá? Insistindo nessas questões, confrontamo-nos com o esqueleto que a física geralmente mantém no armário.

Será que a teoria quântica não se aplica a coisas grandes? Não, a teoria quântica é subjacente a *toda* a física. Precisamos da física quântica para lidar com objetos de escala grande tais como lasers, microchips de silício ou estrelas. Em última análise, o funcionamento de tudo tem a ver com mecânica quântica.

Mas *não vemos* a estranheza quântica numa coisa grande. Com a interpretação de Copenhague, Bohr explicou que devemos aplicar a teoria quântica a coisas pequenas e lidar com coisas grandes em termos clássicos. A maioria dos físicos aceita pragmaticamente essa injunção e não se incomoda com a "não realidade" do pequeno.

Schrödinger, porém, *sentia-se* incomodado. Se a teoria quântica podia negar a realidade dos átomos, negaria também a realidade das coisas grandes feitas de átomos. Schrödinger tinha certeza de que uma coisa tão maluca não podia ser a lei universal da natureza. Podemos imaginar uma conversa entre um Schrödinger incomodado e um jovem colega pragmático:

SCHRÖDINGER: A interpretação de Copenhague é uma saída covarde. A natureza está tentando nos dizer alguma coisa. Copenhague está nos dizendo para não escutar. A teoria quântica é absurda.

COLEGA: Mas, senhor, a sua teoria funciona perfeitamente. Nunca houve uma previsão errada. Então tudo bem!

S: Vamos lá, eu olho e descubro um átomo em algum lugar. A teoria diz que um pouquinho antes de eu olhar ele não estava lá – ele não existia naquele lugar. Não existia *em lugar nenhum*!

C: Isso mesmo. Antes de o senhor olhar para ver onde ele estava, ele era uma função de onda, só probabilidade. O átomo *não existia* em nenhum lugar particular.

S: Você está dizendo que o fato de eu olhar *criou* o átomo no lugar onde o encontrei?

C: Bem, senhor, sim. É isso o que diz a sua teoria.

S: Isso é um solipsismo tolo. Você está negando a existência de um mundo fisicamente real. Esta cadeira em que estou sentado é uma cadeira muito real.

C: Ah, sim, é claro, professor Schrödinger, sua cadeira é real. Só propriedades de coisas pequenas são criadas pela observação.

S: Você está dizendo que a teoria quântica só se aplica a coisas pequenas?

C: Não, senhor, em princípio a sua equação funciona para tudo. Mas é impossível fazer um experimento de interferência com uma coisa grande. Então, para todos os propósitos práticos, não há motivo para se preocupar com a realidade das coisas grandes.

S: Uma coisa grande é apenas um grupo de átomos. Se um átomo não tem realidade física, um grupo deles não pode ser real. Se a teoria quântica diz que o mundo real é criado pelo fato de olharmos para ele, a teoria é absurda!

Por uma técnica lógica chamada *reductio ad absurdum*, redução ao absurdo, Schrödinger contou uma história para argumentar que a teoria quântica conduzia a uma conclusão absurda. Decida você mesmo se aceita ou não seu argumento. Mas espere até apresentarmos também a contraposição ao raciocínio dele.

A história do gato na caixa

Nosso exemplo do par de caixas é o primeiro passo para apresentar o argumento de Schrödinger. Lembre-se de que um átomo incidindo sobre um espelho semitransparente acabará com metade da sua ondulatoriedade em cada uma de duas caixas separadas. Segundo a teoria quântica, o átomo não existe numa caixa específica antes de você encontrar o átomo inteiro em uma das caixas. O átomo está em um estado de superposição simultaneamente nas duas caixas. Quando você olha dentro de uma delas, a ondulatoriedade do estado de superposição colapsa numa caixa única. Você achará ao acaso ou um átomo *inteiro* em uma das caixas *ou* a caixa vazia. (Você não pode escolher o que achar!) Se achar a caixa vazia, o átomo será encontrado na outra. No entanto, com um conjunto de pares de caixas, você *poderia* ter gerado um padrão de interferência demonstrando que, *antes* de olhar, o átomo estava simultaneamente em cada uma das duas caixas.

NOSSA VERSÃO DA HISTÓRIA de Schrödinger decola a partir daqui. Suponha agora que, antes de colocarmos um átomo, uma das caixas do par não esteja vazia. Ela contém um contador Geiger projetado para "disparar" se um átomo entrar na caixa. Ao disparar, esse contador Geiger aciona uma alavanca que puxa a rolha de um frasco de cianeto de hidrogênio. Na caixa há também um gato. O gato morrerá se o venenoso cianeto escapar do frasco. Todo o conteúdo das caixas – o átomo, o contador Geiger, o cianeto e o gato – está isolado e não está sendo observado.

Fazemos questão de imediatamente notar que Schrödinger jamais considerou colocar realmente o gato em perigo. Tratava-se de um experimento *mental*. Ele se referia ao aparelho como "engenhoca infernal".

Agora, argumenta Schrödinger, um contador Geiger é simplesmente um punhado de átomos comuns, ainda que um conjunto complexo e bem organizado. Estritamente falando, é governado pelas mesmas leis da física que regem os átomos dos quais ele é feito. É governado pela mecânica quântica. Presumivelmente a mesma coisa vale também para o gato.

Uma vez que a ondulatoriedade do átomo se divide igualmente no espelho semitransparente, metade vai para a caixa com o contador Geiger e o gato, e metade para a outra caixa. Enquanto o sistema não é observado de maneira nenhuma, isolado do resto do mundo, o átomo está num estado de superposição que podemos descrever como se ele estivesse na caixa com o contador Geiger e, simultaneamente, na caixa vazia. Para sermos sucintos dizemos que o átomo está simultaneamente nas duas caixas.

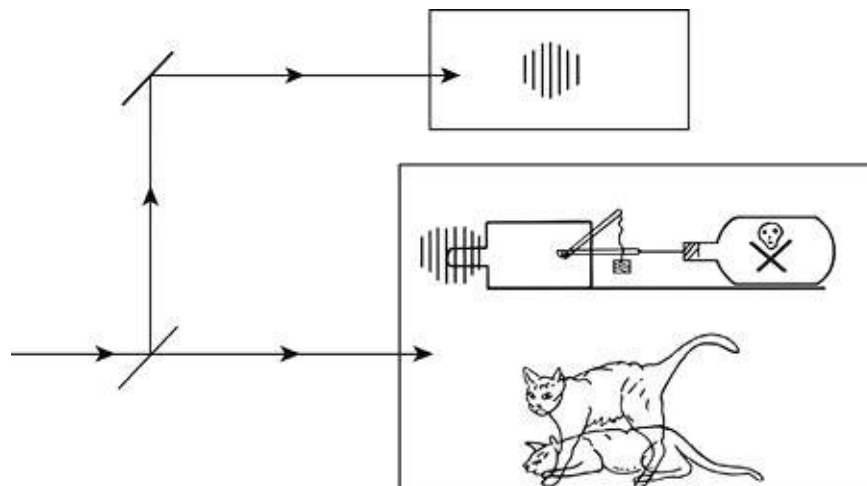



FIGURA 11.1 O gato de Schrödinger.

O contador Geiger não observado, que dispara se o átomo entra na caixa, deve portanto estar também em estado de superposição. Ele é disparado e, ao mesmo tempo, não disparado. A rolha do frasco de cianeto deve estar sendo puxada e não puxada. O gato deve estar tanto morto quanto vivo. Isso é, obviamente, difícil de imaginar. Impossível de imaginar, talvez. Mas é a extensão lógica do que a teoria quântica está nos dizendo.

Estamos mostrando a versão da teoria quântica do nosso gato ainda não observado e do resto da “engenhoca infernal” de Schrödinger com uma imagem metafórica mista. Representamos o átomo mostrando as cristas de sua função de onda em ambas as caixas. Como as funções de onda dos contadores Geiger e dos gatos são complicadas demais para representar, simplesmente retratamos o contador Geiger ao mesmo tempo disparado e não disparado (alavanca para cima e para baixo), a rolha do frasco de cianeto puxada e não puxada, e o gato simultaneamente morto e vivo.

O que você verá se agora olhar dentro de uma das caixas para ver se o gato está morto ou vivo? Recuando para quando havia apenas um átomo em estado de superposição em nosso par de caixas, qualquer olhada numa das caixas colapsava o átomo totalmente numa caixa ou na outra. Aqui, uma olhada faz colapsar a função de onda de todo o sistema.

A teoria quântica prevê uma situação autoconsistente. Se você achar o gato morto, então o contador Geiger deve ter disparado, a rolha do frasco de cianeto terá sido puxada e o átomo estará na caixa com o gato. Se você achar o gato vivo, o contador Geiger não terá disparado, o frasco de cianeto estará tampado com a rolha e o átomo estará na outra caixa.

Mas, segundo a teoria quântica, *antes* de você olhar, o átomo *não* estava nem numa caixa nem na outra. Estava em estado de superposição, simultaneamente em ambas. Portanto, admitindo que gatos não sejam entidades que violem as leis da física, antes de você olhar, o gato estava em estado de superposição, igualmente vivo e morto. Não era um gato doente. Era um gato perfeitamente saudável e ao mesmo tempo um gato absolutamente morto.

Embora a condição de vivo ou morto do gato não existisse como realidade física até ser observada, a existência do gato na caixa *era* uma realidade. Mas, presumivelmente, apenas porque a existência do gato na caixa foi observada por quem quer que o tenha colocado lá.

Como foi a sua olhada que fez colapsar o estado de superposição do gato, você é culpado de matar o gato se o achar morto? Na verdade não, presumindo

que, em primeiro lugar, não tenha feito nenhum arranjo na "engenhoca infernal". Você não poderia ter escolhido o modo como a função de onda desse sistema inteiro iria colapsar. O colapso no estado de vivo ou morto foi aleatório.

EIS ALGO PARA PONDERAR: suponha que o gato tivesse sido colocado na caixa e o átomo enviado ao sistema de espelhos oito horas antes de você olhar. O sistema evolui sem ser observado durante essas oito horas. Se você achar o gato vivo, como já se passaram oito horas sem que ele comesse, encontrará um gato faminto. Se achar um gato morto, o exame de um veterinário patologista forense determinaria que o gato morreu oito horas atrás. Sua observação não só cria uma realidade atual, ela também cria a história condizente com essa realidade.

Você poderia considerar tudo isso um absurdo. É precisamente esse o ponto de Schrödinger! Ele concebeu sua história do gato para argumentar que, levada à sua conclusão lógica, a teoria quântica era absurda. Portanto, argumentou ele, não deve ser aceita como descrição do que está *realmente* acontecendo.

Observe que o enigma colocado pela história do gato de Schrödinger não é neutro, em termos de teoria quântica, como era o enigma colocado pelo fato de podermos decidir livremente provar que um objeto tinha estado ou inteiramente numa única caixa ou espalhado por duas. A história de Schrödinger apresenta um enigma colocado pela *teoria* quântica. A teoria quântica descreve o mundo físico não observado como uma superposição de potencialidades. Isso entra em conflito com nossa observação consciente, que nos diz que o mundo físico está num estado definido.

A ideia de um gato simultaneamente vivo e morto era, obviamente, tão ridícula para outros físicos quanto era para Schrödinger. Mas poucos se preocuparam com a demonstração de Schrödinger do absurdo da teoria. A teoria funcionava bem demais para que um mero absurdo desses fosse um desafio sério.

Não vale espiar

Retornaremos em breve à controvérsia que a história de Schrödinger ainda hoje levanta. Mas, primeiro, se o gato está simultaneamente vivo e morto, será que existe algum jeito de *vê-lo* dessa maneira? Não. Embora tenhamos desenhado um gato vivo e morto superposto (figura 11.1), você jamais *verá* um gato como esse. A observação faz colapsar o sistema inteiro pondo o gato num estado ou vivo ou morto. Mas e se for só uma espiada? Será que uma simples espiadinha consegue fazer colapsar a função de onda de um gato inteiro?

Considere a menor espiadinha possível. Isso significaria fazer incidir um único fóton sobre o gato através de minúsculos furos na caixa. Com um único fóton não se pode descobrir muita coisa. Mas se esse fóton é bloqueado, dizendo-nos que o gato estava de pé, e portanto vivo, esse "olhar" já faria colapsar o estado de superposição das caixas para o gato no estado vivo. A teoria quântica nos diz que *qualquer* olhada, qualquer coisa que forneça informação, faz colapsar o estado anteriormente existente.

Suponha que vejamos o fóton *realmente* atravessando os furos na caixa. Sabemos então que o gato não está de pé. Esse "olhar" faz colapsar o estado das caixas numa superposição de todos os estados consistentes com essa observação. Essa superposição incluiria o estado de um gato morto (e um contador Geiger acionado), mas também o estado de um gato vivo, mas deitado (e um contador Geiger não acionado).

ESPERE UM INSTANTE! E o *gato*, será que ele não pode observar se a rolha do frasco de cianeto foi puxada, e portanto se o átomo entrou na sua caixa? Será que gatos se qualificam como observadores e fazem colapsar funções de onda? Bem, se gatos sim, que tal mosquitos? Vírus? Contadores Geiger? Até onde podemos chegar? Acreditamos que os dois gatos espertos que vivem com cada um de nós certamente são observadores conscientes. Mas como podemos ter certeza?

Estritamente falando, tudo o que sabemos ao certo é que *você* é um observador capaz de fazer colapsar uma função de onda. O resto de nós pode estar meramente num estado de superposição governado pela mecânica quântica

e somos colapsados numa realidade específica apenas pela observação que você faça de nós. É claro que, como o resto de nós olha e age mais ou menos como você, você confia que também nos qualifiquemos como observadores. (No capítulo 15 discutiremos a interpretação dos "muitos mundos" da mecânica quântica, que sugere que estamos *todos* em estados de superposição.)

EMBORA POSSA SER VISTO como uma extensão lógica do que diz a teoria quântica, um papo solipsista segundo o qual somos o único observador é pura tolice. Como alternativa, alguns têm considerado seriamente a possibilidade de que a mecânica quântica insinue uma misteriosa conexão da observação *consciente* com o mundo físico. Eugene Wigner, um dos mais recentes responsáveis pelo desenvolvimento da teoria quântica e ganhador do prêmio Nobel de Física, criou uma versão da história do gato sugerindo um envolvimento ainda mais forte do observador consciente com o mundo físico do que a história de Schrödinger.

Em vez de um gato, Wigner considerou ter uma amiga que fica sem ser observada numa das caixas, neste caso uma sala. Desta vez, nada de cianeto. O contador Geiger dispara simplesmente fazendo "clique". A amiga marca um "X" num bloquinho se ouvir um clique. Wigner considerou que o status da amiga como observadora era igual ao seu. Assim, assumiu que não fazia colapsar a função de onda da amiga em estado de superposição ao abrir a porta da sala e olhar seu bloco. Ela nunca esteve em estado de superposição. Ele presumiu que pelo menos todos os seres humanos têm status de observador. Wigner *especulou* que o colapso acontece exatamente no último estágio do processo de observação, que a consciência humana da amiga de alguma forma fez colapsar a função de onda do sistema físico. Indo ainda mais longe, especulou se a percepção humana "consciente"[b] poderia efetivamente "estender seu alcance" – de algum modo inexplicado – e mudar o estado físico de um sistema.

Tal "estender o alcance" nos parece não razoável. E Wigner também acabou pensando assim. Mas não se pode provar o contrário. Tudo o que sabemos é que em algum lugar na escala entre moléculas grandes e seres humanos há esse misterioso processo de observação e colapso. E é no mínimo concebível que

esteja de fato no último passo, a tomada de consciência. Exploramos nos últimos capítulos algumas ideias referentes a isso que foram propostas seriamente.

A resposta à história de Schrödinger

Entramos agora num território emocional. A maioria dos físicos se contorce de sofrimento quando sua disciplina é associada a temas "suaves" como consciência. Alguns físicos alegam que a história do gato é um absurdo, que é enganoso até mesmo discutir essas coisas. Quando pessoas razoáveis discordam em relação a questões *testáveis*, implicitamente assumem a atitude "Posso estar errado". Quando a refutação parece impossível, muitas vezes as pessoas ficam *seguras* de si mesmas. A impossibilidade prática de demonstrar, ou refutar, a história do gato de Schrödinger é o caso em questão. Alguns físicos chegam a ficar furiosos quando a história é contada. Stephen Hawking alega que é "capaz de pegar o revólver".

Vamos dar uma resposta mais ou menos padronizada à história de Schrödinger. Antes de tudo, porém, uma declaração de "propaganda honesta": somos solidários com a preocupação de Schrödinger. Não fosse assim, não estaríamos escrevendo este livro. No entanto, vamos apresentar o argumento mais forte que podemos de que a história de Schrödinger é irrelevante e enganosa. Ao longo dos próximos parágrafos assumimos esse ponto de vista.

> O argumento de Schrödinger é falho porque repousa sobre a premissa de que objetos macroscópicos podem permanecer não observados em estado de superposição. Para todos os propósitos práticos, qualquer objeto macroscópico é *constantemente* "observado". Uma coisa grande não pode ser isolada; está sempre em contato com o resto do mundo. E esse contato *é* observação!
>
> É ridículo sequer *imaginar* que um gato possa ser isolado. Todo objeto macroscópico em qualquer lugar perto do gato observa o gato. Os fótons emitidos pelo calor do gato para as paredes da caixa significam que a caixa observa o gato. Tomemos um exemplo extremo: a Lua! A gravidade da Lua, que atrai oceanos de modo a fazer subir as marés, também atrai o gato. Essa atração seria ligeiramente diferente para um gato vivo, de pé, do que para um gato morto, deitado. Como o gato atrai a Lua de volta, a trajetória da Lua é ligeiramente alterada dependendo da posição do gato. Por menor que seja o efeito, é fácil calcular que numa fração mínima de milionésimo de segundo a função de onda do gato ficaria totalmente emaranhada com a da Lua, e portanto com as marés e portanto com o resto do mundo. Esse emaranhamento *é* uma observação. Ele faz colapsar o estado de superposição do gato praticamente de imediato.

Mesmo olhando para trás, para o estágio inicial da história de Schrödinger, pode-se ver o quanto ela é absolutamente sem sentido. Quando um átomo é enviado para as caixas de Schrödinger, sua função de onda fica emaranhada com a imensamente complexa função de onda do macroscópico contador Geiger. O átomo é portanto "observado" pelo contador Geiger. Como algo grande como o contador Geiger não pode ser isolado do resto do mundo, o resto do mundo observa o contador Geiger, e portanto o átomo. O emaranhamento com o mundo *constitui* observação, e o átomo colapsa em uma caixa ou outra tão logo sua função de onda entre no par de caixas e encontre o contador Geiger. Depois disso, o gato está ou morto ou vivo. Ponto final!

Mesmo que você (desnecessariamente!) introduza a consciência no argumento, coisas grandes estão constantemente sendo observadas ainda que seja somente porque coisas grandes estão constantemente em contato com seres conscientes.

Se tais argumentos não podem convencê-lo de que não há nada de especial na história do gato, eis aqui uma refutação final do argumento de Schrödinger de ter demonstrado um problema com a teoria quântica: *faça* o experimento! Você sempre obtém o resultado que a teoria quântica prediz; sempre vê ou um gato vivo ou um gato morto.

Além disso, a interpretação de Copenhague deixa claro que o papel da ciência é prever os resultados de observações, não discutir alguma "realidade definitiva". Predições daquilo que vai acontecer é tudo de que precisamos. Nesse caso, você achará o gato vivo metade das vezes e morto metade das vezes. A consciência é irrelevante. A história do gato levanta uma "não questão" enganosa.

Agora não estamos mais falando no papel de alguém respondendo ao argumento de Schrödinger, e voltamos para a nossa própria voz. A impossibilidade física de isolar um objeto grande como um gato para demonstrar que esteja num estado de superposição é certamente correta. Schrödinger estava, é claro, plenamente ciente dessa dificuldade. Ele argumentaria que tais problemas práticos são irrelevantes. Como a teoria quântica não admite fronteira entre o pequeno e o grande, em princípio *qualquer* objeto pode estar em estado de superposição. Ele (junto com Einstein) rejeita como derrotista a alegação de Copenhague de que o papel da ciência é meramente prever os resultados de experimentos, em vez de explorar o que *realmente* está acontecendo.

Não importa que lado desta discussão você prefira, há especialistas que concordam com você.

O gato de Schrödinger hoje

Oito décadas depois que Schrödinger contou sua história, quase todo ano há conferências que abordam o enigma quântico e geralmente incluem discussões sobre consciência. As referências à história do gato em publicações de física profissionais estão sempre aumentando. Dois exemplos: um artigo, “O estado de superposição ‘gato de Schrödinger’ de um átomo”, demonstra tal estado para um sistema microscópico. Em outro, “Rato atômico sonda o período de vida de um gato quântico”, o “rato” é um átomo e o “gato” um campo eletromagnético numa cavidade de ressonância macroscópica. Embora sejam projetos de física sérios e caros, os títulos ilustram como nossa disciplina está inclinada a abordar a estranheza da mecânica quântica com um pouco de humor.

Falando de humor, eis uma charge da edição de maio de 2000 da *Physics Today*, a mais difundida publicação do Instituto Americano de Física. Provavelmente não teria sido publicada vinte anos antes.

Embora os aspectos misteriosos da mecânica quântica ainda sejam dificilmente discutidos em cursos de física, o interesse pelo assunto aumenta. Um texto best-seller de mecânica quântica mostra a figura de um gato vivo na capa e de um gato morto na contracapa – apesar de, no interior do livro, se falar muito pouco sobre o gato. (Provavelmente quem escolheu a capa foram os editores, não o autor. Mas instrutores escolhem o texto, e acreditamos que a alusão ao mistério seja atraente a professores mais jovens.)

FIGURA 11.2 Desenho de Aaron Drake, 2000. © Instituto Americano de Física.

Estudos experimentais sobre os aspectos misteriosos da mecânica quântica que não teriam sido propostos anos atrás, e não teriam recebido verba se propostos, agora recebem atenção considerável. Objetos cada vez maiores estão sendo postos em estados de superposição, colocados em dois lugares ao mesmo tempo. O físico austríaco Anton Zeilinger fez isso com grandes moléculas de setenta átomos de carbono em formato de bolas de futebol. Ele está atualmente se propondo a fazer a mesma coisa com proteínas de tamanho médio e um vírus. Numa conferência recente, perguntaram-lhe: “Qual é o limite?” Sua resposta: “Só o orçamento.”

Foram demonstradas superposições verdadeiramente macroscópicas, com muitos bilhões de elétrons, onde cada um deles se move simultaneamente em duas direções. Têm sido criados condensados de Bose-Einstein em que cada um de vários milhares de átomos está espalhado por vários milímetros. Um boletim noticioso de 2003 do Instituto Americano de Física trazia a manchete “Três mil e seiscentos átomos em dois lugares ao mesmo tempo”. E esta é a primeira sentença de um artigo de 2007 no *Physical Review Letters*, importante

publicação de pesquisa em física: “A corrida para observar o comportamento mecânico quântico em sistemas nanoeletromecânicos (Nems, na sigla em inglês) feitos pelo homem está nos aproximando mais que nunca de testar os princípios básicos da mecânica quântica.” Está cada vez mais difícil desprezar a preocupação de Schrödinger dizendo que a estranheza só é evidente com coisas pequenas que nunca vemos realmente.

Talvez o mais difícil de aceitar seja a alegação de que a observação que você faz cria não só uma realidade presente como também um passado apropriado a essa realidade – que, quando seu ato de olhar colapsou o gato para que estivesse vivo ou morto, você também criou a história apropriada para um gato faminto havia oito horas ou um gato morto oito horas antes.

O “experimento da escolha retardada” sugerido pelo cosmólogo quântico John Wheeler, e discutido no capítulo 7, é o que chega mais perto de testar o aspecto “retroativo” da teoria quântica. Ele confirma a previsão da teoria quântica de que a observação cria uma história passada.

É MUITO CHATO QUE Schrödinger não esteja mais por aí para ver o crescente interesse em seu gato. Ele sentia que a natureza estava tentando nos dizer algo, e que os físicos deviam olhar além da aceitação pragmática da teoria quântica. Ele concordaria com John Wheeler: “Em algum lugar alguma coisa incrível está esperando para acontecer.”

---

[b] “*Human conscious awareness*”, no texto original. (N.T.)

12. Buscando um mundo real
EPR

> Penso que uma partícula deve ter uma realidade separada, independente das medições. Ou seja, um elétron tem spin, localização e assim por diante, mesmo quando não está sendo mensurado. Gosto de pensar que a Lua está lá mesmo que eu não esteja olhando para ela.
>
> ALBERT EINSTEIN

SCHRÖDINGER CONTOU SUA história do gato aplicando estritamente a teoria quântica ao grande como ao pequeno. Sua ideia era ridicularizar a alegação da teoria de que nossa observação *criava* a realidade que experimentamos. Esse argumento realmente parece maluco. De fato, se alguém num julgamento convencesse o júri de que acreditava que seu olhar efetivamente *criava* o mundo físico, o júri provavelmente aceitaria uma alegação de insanidade.

A interpretação de Copenhague é, obviamente, mais sutil. Ela não nega um mundo fisicamente real. Argumenta apenas que objetos do reino *microscópico* carecem de realidade antes de serem observados. Luas, cadeiras e gatos são reais, nem que seja unicamente porque objetos macroscópicos não podem ser isolados e portanto são observados constantemente. E isso, segundo Copenhague, já deve ser suficiente. Mas não era suficiente para Einstein.

Na Conferência Solvay de 1927, Einstein, então o cientista mais respeitado do mundo, virou seu polegar para baixo para a recém-cunhada interpretação de Copenhague. Ele insistia que mesmo coisas pequenas têm realidade independente, esteja alguém olhando ou não. E, se a teoria quântica dissesse outra coisa, tinha de estar errada. Niels Bohr, o principal arquiteto da interpretação de Copenhague, levantou-se em defesa da sua teoria. Pelo resto da vida, Bohr e Einstein debateram como amistosos adversários.

Fugindo de Heisenberg

Segundo a teoria quântica um átomo é *ou* uma onda espalhada ou uma partícula concentrada. Se, por um lado, você olha e o vê saindo de uma caixa única (ou atravessando uma fenda única), isso mostra que ele é uma coisa compacta que estava inteiramente numa única caixa. Por outro lado, você pode ter optado livremente por fazer o átomo participar de um padrão de interferência, mostrando que ele era uma coisa espalhada, *não* totalmente numa única caixa. Você pode mostrar qualquer uma das duas situações *contraditórias*. A teoria aparentemente inconsistente está protegida de refutação pelo princípio da incerteza de Heisenberg. Nesse caso, qualquer olhar para ver de qual caixa vem o átomo o "chutaria" com força suficiente para borrar qualquer padrão de interferência. Logo, você não conseguiria demonstrar uma inconsistência *lógica*.

PARA ARGUMENTAR QUE a teoria quântica era inconsistente e, portanto, errada, Einstein tentou mostrar que, mesmo que um átomo participasse de um padrão de interferência, *na verdade* ele passava por uma fenda única. Para demonstrar isso ele precisaria *fugir* do princípio da incerteza. (Ironicamente, Heisenberg atribuía sua ideia original para o princípio da incerteza a uma conversa com Einstein.) Eis o desafio de Einstein a Bohr na Conferência Solvay de 1927:

Mande átomos na direção de um diafragma com duas fendas, um átomo de cada vez. Faça com que o diafragma seja móvel, digamos, preso a uma pequena mola. Considere o caso mais simples, um átomo que pousou no centro máximo do padrão de interferência (ponto A na figura 12.1). Se esse átomo por acaso passou pela fenda inferior, teve de ser desviado para cima pela barreira para pousar naquele ponto. Em reação, o átomo impulsionaria o diafragma para baixo. E vice-versa se tivesse passado pela fenda superior

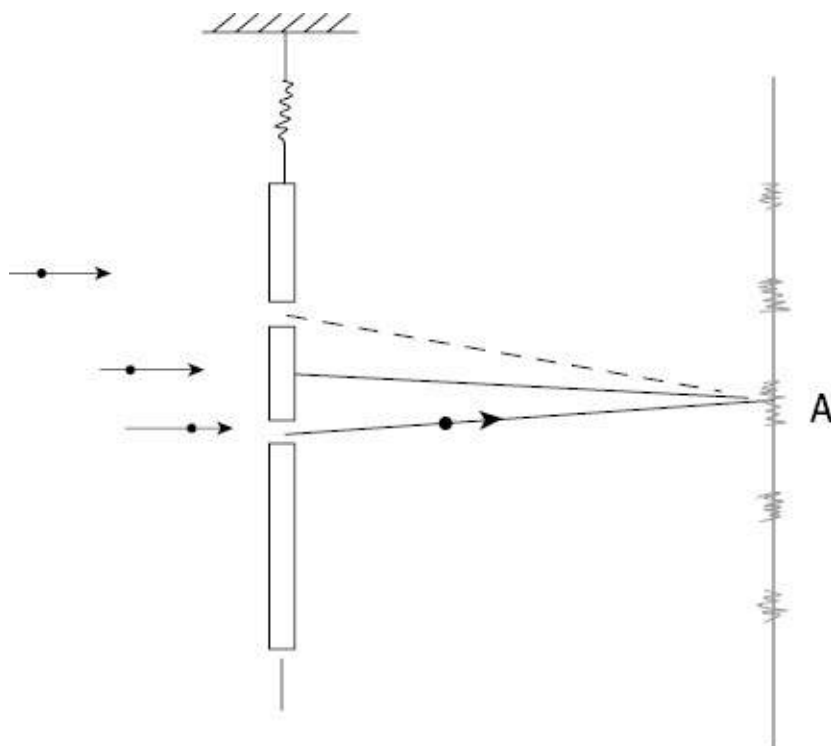



FIGURA 12.1 Átomos disparados um de cada vez através de uma barreira móvel com duas fendas.

Medindo o movimento da barreira depois da passagem de cada átomo, seria possível saber por qual das fendas ele passou. Essa medição poderia ser feita mesmo depois que o átomo tivesse sido registrado como parte de um padrão de interferência num filme fotográfico. Como dessa maneira seria possível saber por qual fenda *única* cada átomo passou, a teoria quântica teria de estar errada ao explicar o padrão de interferência argumentando que cada átomo era uma onda passando por *ambas* as fendas.

Bohr apontou prontamente a falha no raciocínio de Einstein: para sua demonstração, seria preciso conhecer simultaneamente tanto a posição inicial do diafragma quanto qualquer movimento que ele pudesse ter tido. O princípio da incerteza limita a precisão com que se pode conhecer simultaneamente tanto a posição quanto o movimento de um objeto. Com álgebra simples, Bohr foi capaz de mostrar que essa incerteza para o diafragma com fendas seria grande o bastante para frustrar a demonstração de Einstein.

TRÊS ANOS DEPOIS, em outra conferência, Einstein propôs um engenhoso experimento mental, alegando violar uma versão do princípio da incerteza. Ele determinaria tanto o instante em que um fóton saía de uma caixa como a sua energia, ambos com uma exatidão tão grande quanto se desejasse. Einstein faria um fóton ricochetear de um lado para outro numa caixa. Um relógio controlaria uma portinhola, permitindo que o fóton saísse, e registraria o preciso instante de saída do fóton. Pesando tranquilamente a caixa antes e depois de o fóton sair, e usando $E = mc^2$, seria possível saber a mudança exata de energia do sistema, e portanto a energia do fóton. Determinando tanto a energia quanto o tempo com a precisão que se desejasse estaríamos violando o princípio da incerteza.

Isso custou a Bohr uma noite de insônia. Mas na manhã seguinte ele constrangeu Einstein ao lhe mostrar que havia ignorado sua própria teoria da relatividade geral. Para pesar a caixa, é preciso permitir que ela se movimente no campo gravitacional da Terra. Segundo a relatividade geral, isso alteraria a leitura do relógio o suficiente para impedir a violação do princípio da incerteza. Anos mais tarde, Bohr revisitou seu triunfo com uma caricatura exagerada do experimento “fóton na caixa” de Einstein, ilustrando que em qualquer experimento quântico é preciso considerar o equipamento macroscópico realmente utilizado.

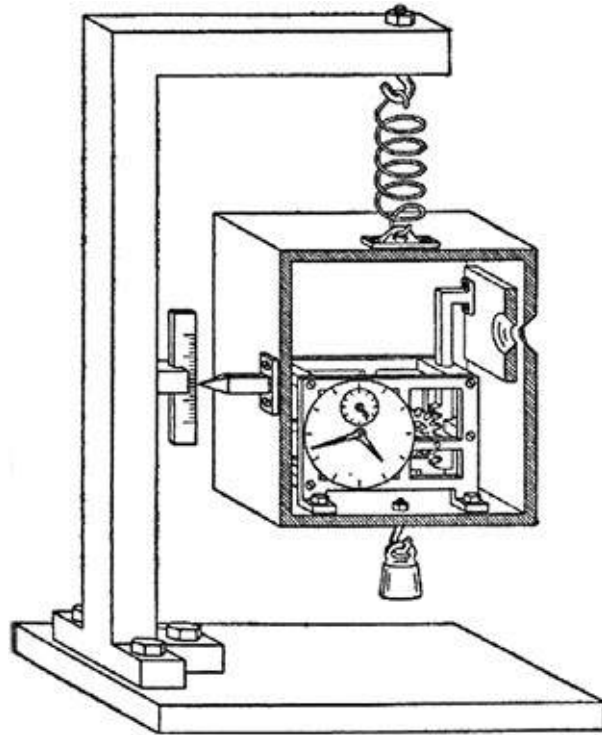



FIGURA 12.2 Desenho de Bohr do experimento mental “fóton na caixa” concebido por Einstein. Cortesia HarperCollins.

A LÓGICA DAS refutações de Bohr aos experimentos mentais de Einstein tem sido questionada. No capítulo 10 mencionamos que Bohr disse que “instrumentos de medição [precisam ser] corpos rígidos suficientemente pesados para permitir uma informação totalmente clássica de suas posições e velocidades relativas”. Seria a aplicação de Bohr da incerteza mecânico-quântica ao diafragma com fendas *macroscópico* e seu aparato de caixa de fótons consistente com sua exigência de uma “informação totalmente clássica” dos instrumentos de medida macroscópicos?

FIGURA 12.3 Albert Einstein e Niels Bohr na Conferência Solvay de 1930, em Bruxelas. Foto de Paul Ehrenfest. Niels Bohr Archives.

Bohr ao menos parece concordar que a teoria quântica se aplica em princípio tanto ao grande quanto ao pequeno. Só que para todos os propósitos *práticos* as coisas grandes se comportam classicamente. Mas os argumentos de Bohr convenceram Einstein de que a teoria era ao menos consistente e que suas predições sempre estariam corretas. Um Einstein humilde foi daquela conferência para casa para concentrar-se na relatividade geral, sua teoria da gravidade. Ou assim pensou Bohr.

Um raio do nada

Bohr estava errado. Einstein não abandonara sua tentativa de refutar a teoria quântica. Quatro anos depois (em 1935), um artigo de Einstein e dois jovens colegas, Boris Podolsky e Nathan Rosen, chegou a Copenhague. Um colega de Bohr conta que "essa investida caiu sobre nós como um raio do nada. Seu efeito sobre Bohr foi impressionante … logo que Bohr ouviu meu relato do argumento de Einstein, todo o resto foi abandonado".

O artigo, hoje famoso como "EPR", de "Einstein, Podolsky e Rosen", não alegava que a teoria quântica estava errada, só que era *incompleta*. O EPR argumentava que a teoria quântica não descrevia o mundo fisicamente real. Ela requeria uma realidade criada pelo observador simplesmente porque não contava a história toda.

O EPR mostrava que se pode, na verdade, conhecer uma propriedade de um objeto sem observá-la. Portanto, essa propriedade, argumentava o EPR, *não* era criada pelo observador. Não sendo criada pelo observador, era uma realidade física. Se a teoria quântica não incluía tais realidades físicas, era incompleta. Eis uma analogia clássica – uma analogia que estimulava o argumento EPR de Einstein.

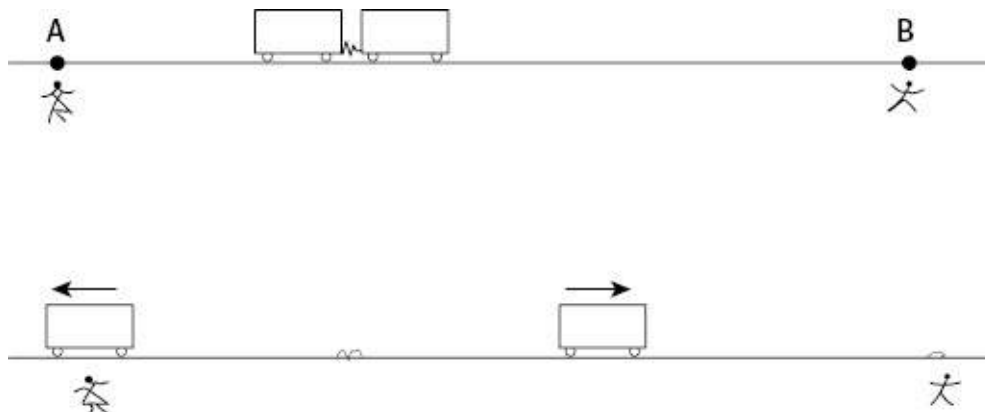



FIGURA 12.4 Uma analogia clássica do argumento EPR.

Considere dois vagões de trem idênticos ligados porém separados por uma forte mola. Subitamente desconectados, eles partem na mesma velocidade em sentidos opostos. Alice, à esquerda na figura 12.4, está um pouco mais perto do ponto de partida dos dois vagões que Bob, à direita. Observando a posição do vagão que passa por ela, Alice imediatamente sabe a posição do vagão de Bob. Sem ter nenhum efeito sobre o vagão de Bob, Alice não criou sua posição. Ainda sem ter observado seu vagão, Bob não criou sua posição. A posição do vagão de Bob não foi criada pelo observador. Era, portanto, uma realidade física. (Cerca de uma década atrás, os físicos falariam em "observador A" e "observador B" num experimento de tipo EPR. Atualmente a convenção mais amigável é "Alice" e "Bob".)

A conclusão a que se chega nessa história de Alice e Bob é tão óbvia que parece trivial. Mas substitua os vagões por dois átomos se distanciando em sentidos opostos. A teoria quântica os descreve como pacotes de onda espalhados. Sua existência numa posição *particular* não é uma realidade até a posição de um deles ser observada.

INFELIZMENTE, há um problema em converter a facilmente visualizável analogia dos vagões para uma situação quântica: o princípio da incerteza proíbe saber com suficiente exatidão simultaneamente a velocidade e a posição iniciais dos vagões. Pulamos portanto o artifício matemático do EPR, engenhoso mas difícil de visualizar, e vamos para a versão do EPR do fóton polarizado, inventada por David Bohm. Vale a pena explorar a versão dos fótons polarizados porque as misteriosas influências quânticas eventualmente reveladas por experimentos de tipo EPR são vistas com maior simplicidade com fótons. A demonstração real dessas influências quânticas é tema do nosso próximo capítulo. Mas, primeiro, precisamos ver por que Einstein as considerava "fantasmagóricas".

Nas páginas seguintes, examinamos um pouco da física da luz polarizada, e de fótons polarizados, para poder apresentar depois o profundo argumento EPR de maneira compacta. Mesmo que você só passe superficialmente por essas

páginas até a seção intitulada “EPR”, ainda assim poderá apreciar a essência do argumento de Einstein.

Luz polarizada

A luz, lembremos, é uma onda de campo elétrico (e magnético). O campo elétrico da luz pode apontar em qualquer direção perpendicular à trajetória da luz. No desenho superior da figura 12.5, a luz está entrando na página, com seu campo elétrico na direção vertical. Essa luz está “polarizada verticalmente”. O outro desenho mostra uma onda de luz polarizada horizontalmente. A direção do campo elétrico da luz é a direção da sua polarização. De agora em diante diremos somente “polarização” em vez de “direção de polarização”.

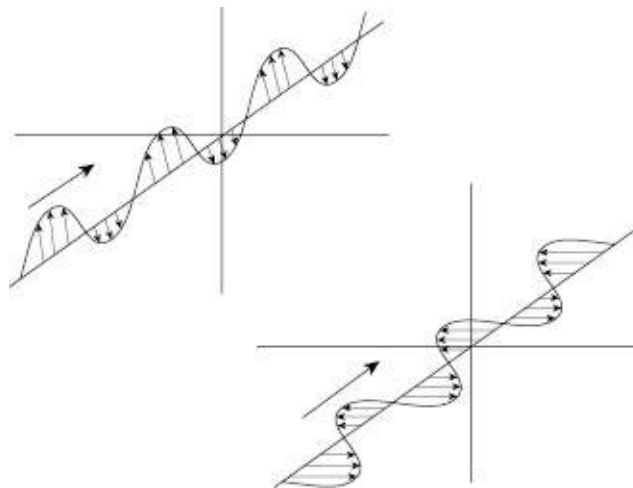



FIGURA 12.5 Luz polarizada verticalmente e horizontalmente.

Não há nada de especial, é claro, nas direções vertical e horizontal – além de serem perpendiculares entre si. É simplesmente convencional falar de “vertical” e “horizontal”.

A polarização da luz do sol ou de uma lâmpada – na verdade, da maior parte dos tipos de luz – varia aleatoriamente. Tal luz é “não polarizada”. Certos materiais deixam passar apenas luz polarizada segundo uma direção particular. Tais “polarizadores” em óculos de sol eliminam o brilho intenso ao não transmitir a luz extremamente polarizada horizontalmente refletida de superfícies

horizontais, tais como rodovias ou água. Mas vamos descrever um tipo diferente de polarizador.

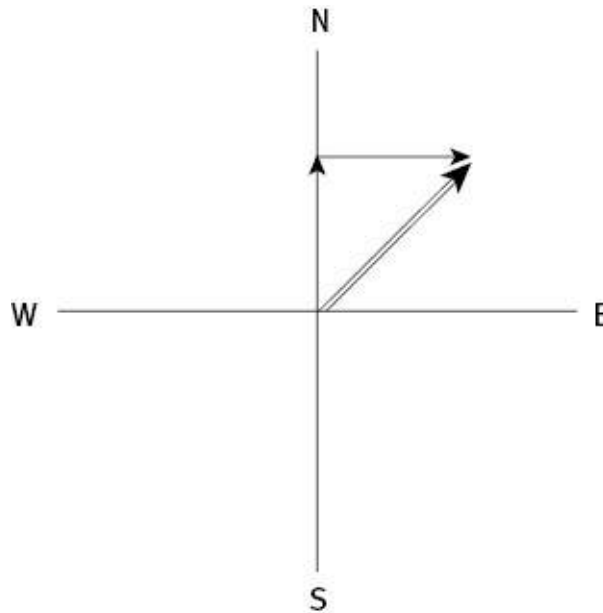



FIGURA 12.6 Trajetória para nordeste como soma de trajetórias para norte e depois para leste.

Polarizadores usados nos experimentos mais precisos são cubos transparentes formados por dois prismas. Vamos nos referir a esses cubos como “polarizadores”. Esses polarizadores enviam luz de diferentes polarizações em duas trajetórias diferentes. A luz polarizada paralela a certa direção, o “eixo de polarização”, é enviada pela Trajetória 1, e a luz polarizada perpendicular ao eixo de polarização é enviada pela Trajetória 2.

A luz polarizada segundo um ângulo diferente do paralelo ou perpendicular ao eixo de polarização pode ser considerada como formada pelas componentes polarizadas paralela e perpendicular. (Da mesma maneira que uma viagem para nordeste pode ser pensada como composta de uma viagem com uma componente para o norte e outra para leste.) A componente paralela da luz vai pela Trajetória 1, e a perpendicular pela Trajetória 2. Quanto mais próxima a polarização estiver da paralela, mais luz percorre a Trajetória 1.

Fótons polarizados

A luz é um fluxo de fótons. Detectores de fótons podem contar fótons individuais – milhões deles por segundo. Nossos olhos, aliás, podem detectar uma luz tão tênue quanto poucos fótons por segundo.

A luz polarizada paralela ao eixo de polarização é um fluxo de fótons polarizados paralelamente. Cada um deles percorre a Trajetória 1, para ser registrado pelo detector de fótons da Trajetória 1. Da mesma maneira, o detector da Trajetória 2 registrará todo fóton polarizado perpendicularmente ao eixo de polarização. Os fótons de luz comum, não polarizada, são polarizados aleatoriamente. Ao encontrar o polarizador, cada um é registrado pelo detector da Trajetória 1 ou da Trajetória 2. Na figura 12.7 mostramos um fóton como um ponto, sua polarização como uma seta de duas pontas, o polarizador como uma caixa e os detectores como D1 e D2.

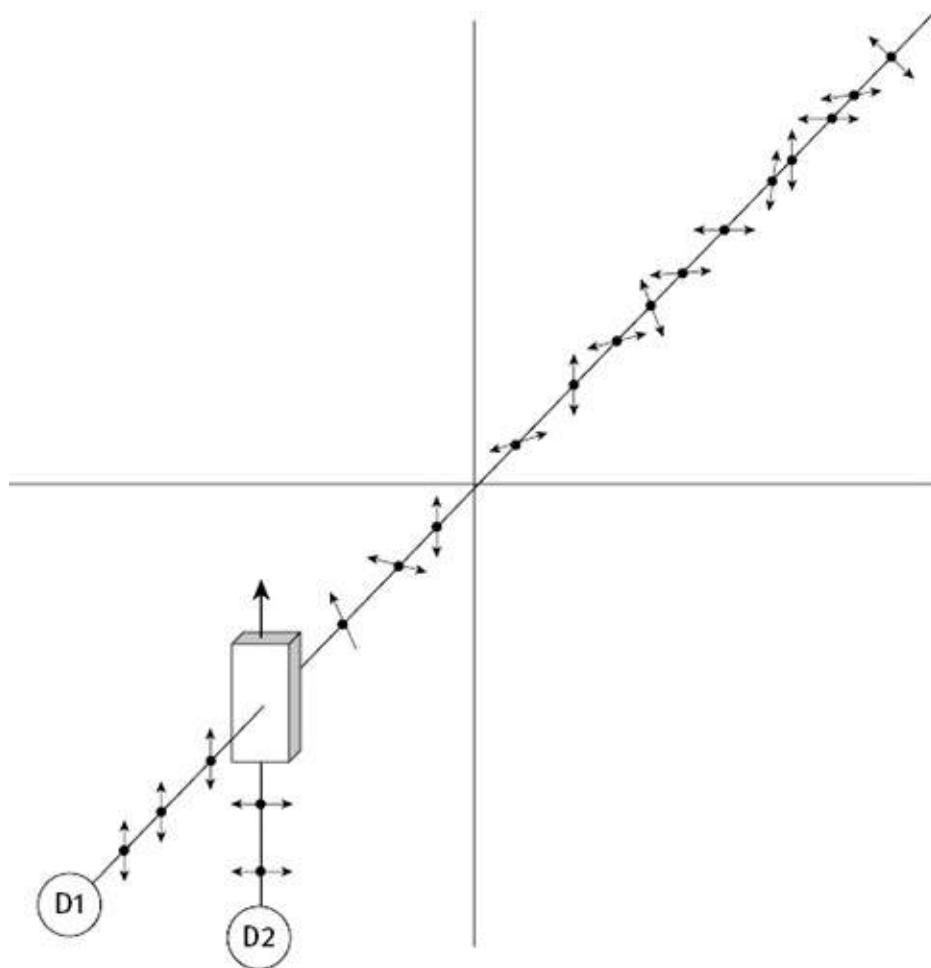



FIGURA 12.7 Fótons polarizados aleatoriamente ordenados por um polarizador.

E quanto aos fótons polarizados num outro ângulo que não paralelo ou perpendicular ao eixo de polarização? Tais fótons têm certa *probabilidade* de ser registrados pelo detector da Trajetória 1 ou da Trajetória 2. Um fóton polarizado em 45 graus em relação ao eixo de polarização, por exemplo, tem igual probabilidade de ser registrado por qualquer um dos detectores. Quanto mais próxima a polarização estiver da paralela ao eixo de polarização, maior a probabilidade de ser registrada pelo detector da Trajetória 1.

Tivemos o cuidado de *não* dizer que um fóton em algum ângulo não paralelo ou perpendicular efetivamente *percorreu* qualquer um desses trajetos. Ele na verdade entra num estado de superposição, tendo simultaneamente *ambas* as polarizações e percorrendo simultaneamente *ambos* os trajetos. Um fóton polarizado a 45 graus, por exemplo, percorre igualmente os dois caminhos.

Mas nós nunca vemos fótons parciais. Um detector clica e registra um fóton inteiro, ou permanece em silêncio, indicando que nenhum fóton passou. A situação para um fóton que percorra ambos os caminhos é análoga à de nosso átomo simultaneamente nas duas caixas.

Poderíamos demonstrar que um fóton está em estado de superposição em ambos os trajetos mediante algo análogo a um experimento de interferência. Em vez de ter um detector em cada trajeto, fazemos com que espelhos dirijam cada trajeto através de um segundo polarizador, que recombina as componentes paralela e perpendicular do fóton de modo a reproduzir o fóton original. Mudando o comprimento de *qualquer um* dos trajetos, muda-se a polarização do fóton resultante. Isso demonstra que cada fóton estava em *ambos* os trajetos, tinha ambas as polarizações num estado de superposição, antes de ser observado por um detector.

Quando dizemos que detectores de fótons registram fótons, estamos assumindo a postura da interpretação de Copenhague. Estamos considerando os macroscópicos detectores de fótons como observadores. Quando um detector registra a presença de um fóton num trajeto particular, o estado de superposição do fóton colapsa. O que resta é a observação registrada do fóton feita pelo detector.

Einstein, é claro, aceitava os resultados experimentais, mas *não* aceitava essa história de estado de superposição, em que um fóton não tinha nenhuma polarização particular até ser observado. O EPR argumentaria que a polarização de cada fóton tinha de existir como realidade física independente de sua observação. Antes de chegarmos ao argumento EPR para provar esse ponto, precisamos falar de “fótons gêmeos”.

Fótons gêmeos

Átomos podem ser levados a estados excitados a partir dos quais retornam ao estado base por dois saltos quânticos em rápida sucessão, liberando dois fótons. Como não há nada de especial numa direção particular no espaço, as polarizações dos fótons serão aleatórias.

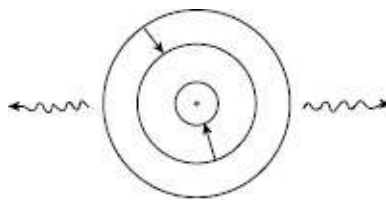



FIGURA 12.8 Uma cascata de dois fótons.

Mas aqui está o ponto *crucial*: para certos estados atômicos, os dois fótons lançados em sentidos opostos sempre exibirão a *mesma* polarização. Os fótons são “gêmeos”. Se, por exemplo, se observar que o fóton que é lançado para a esquerda tem polarização vertical, seu gêmeo, o fóton lançado para a direita, também terá polarização vertical.

O *motivo* de fótons gêmeos sempre exibirem a mesma polarização não tem importância aqui. (É necessário conservar o momento angular, e para a emissão de fótons gêmeos os estados atômicos inicial e final têm o mesmo momento angular.) A única coisa importante é que é *demonstravelmente* verdadeiro que suas polarizações são sempre idênticas.

Para demonstrar isso, voltemos a Alice e Bob, com fótons em vez de vagões de trem. É algo que realmente é feito. Uma fonte de fótons gêmeos encontra-se entre Alice, à esquerda, e Bob, à direita, como na figura 12.9. Cada um observa a polarização dos fótons gêmeos com os eixos de polarização orientados no mesmo ângulo, ambos verticais. Seus detectores de fótons Trajetória 1 e Trajetória 2 clicam *aleatoriamente* registrando a chegada simultânea de fótons

gêmeos aleatoriamente polarizados paralela ou perpendicularmente ao seu eixo de polarização. No entanto, quando Alice observa que seu detector de Trajetória 1 registra um fóton, Bob *sempre* descobre seu gêmeo percorrendo a Trajetória 1 dele, Bob. E, sempre que Alice observa seu detector de Trajetória 2 registrando um fóton, Bob descobre seu gêmeo percorrendo a Trajetória 2 dele, Bob.

Não colocamos setas nos fótons da figura 12.9 porque fótons gêmeos não têm uma polarização específica, eles têm apenas *a mesma* polarização. *Colocamos* setas nos fótons da figura 12.7 porque consideramos os átomos que os emitem como parte do filamento macroscópico de uma lâmpada. Esses átomos, e assim a polarização dos fótons que eles emitem, foram "observados" pelo objeto macroscópico. Nossos fótons gêmeos foram emitidos por átomos isolados num gás, portanto sem contato com nada macroscópico.

Como os fótons são gêmeos, pode não *parecer* estranho que sempre exibam a mesma polarização. Mas é estranho. Vamos brincar com uma analogia: não é nenhuma surpresa que garotos gêmeos idênticos tenham a mesma cor de olhos. Gêmeos idênticos são *criados* com a mesma cor de olhos. Considere, porém, outra propriedade dos gêmeos: a cor das meias que resolvam usar cada dia. Suponha que, mesmo estando distantes, sempre que um dos gêmeos escolhe verde, o outro também escolha verde nesse mesmo dia – ainda que nenhum deles tenha informação sobre a cor escolhida pelo irmão. Isso seria estranho, porque os gêmeos *não foram* criados com a mesma escolha diária da cor das meias. Voltemos aos nossos fótons gêmeos.

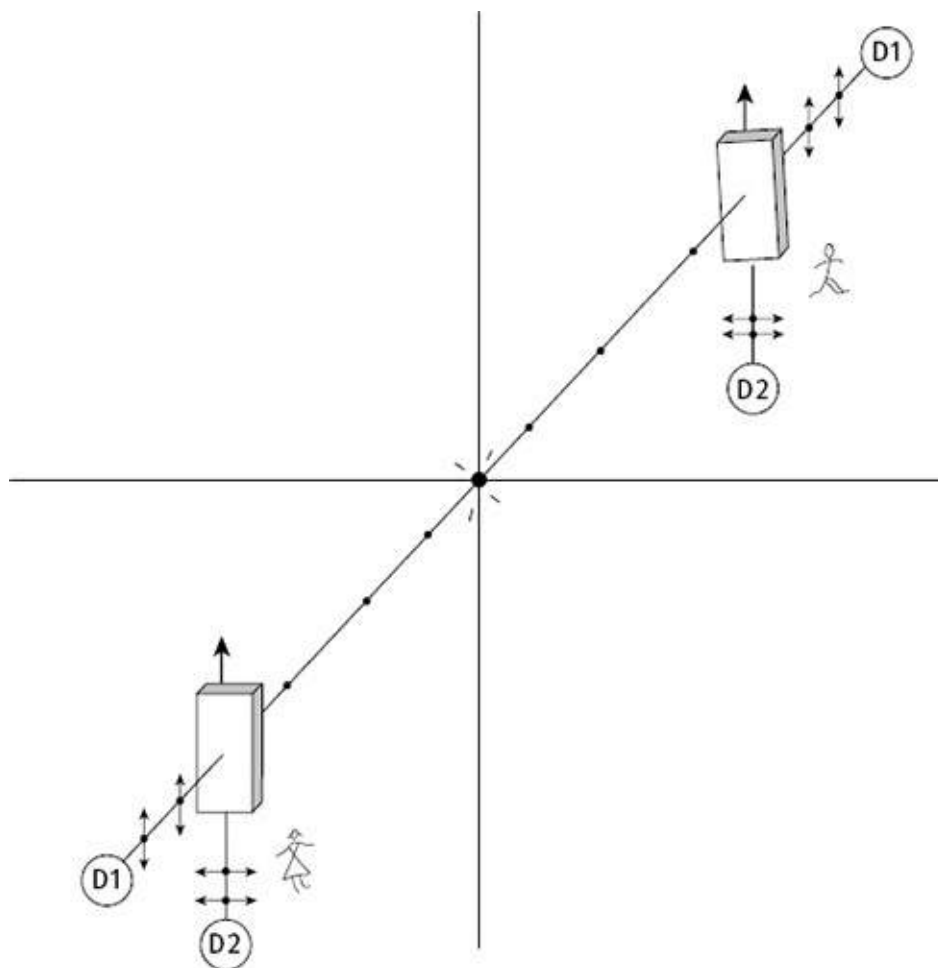



FIGURA 12.9 Alice e Bob com fótons gêmeos.

Suponha que Alice, embora distante de Bob, esteja um pouco mais perto da fonte dos fótons que Bob. Seu fóton seria detectado antes. Quer ele percorra a Trajetória 1 ou a Trajetória 2 de Alice, é algo completamente aleatório. No entanto, se o fóton de Alice for registrado pelo seu detector da Trajetória 1, seu gêmeo *sempre* será registrado pelo detector da Trajetória 1 de Bob.

Como os fótons de Alice e Bob estavam se afastando da fonte em sentidos opostos com a velocidade da luz, sua separação aumentava com o dobro da velocidade da luz. Nenhuma força física poderia jamais conectar esses fótons gêmeos. A detecção da polarização aleatória do fóton feita antes por Alice não poderia afetar *fisicamente* o fóton de Bob. Como, então, o fóton de Bob adquire instantaneamente a polarização aleatória do fóton de Alice?

Não é o *fato em si* de fótons gêmeos exibirem polarização idêntica que é estranho. Seria possível pensar que eles simplesmente foram criados não só com a *mesma* polarização, mas também com uma polarização *particular*. Afinal, nossos garotos gêmeos não foram só criados com a *mesma* cor de olhos, mas com uma cor de olhos *particular*, azul.

A coisa estranha é a *explicação* dada pela teoria quântica para o fato de dois fótons gêmeos exibirem polarização idêntica. Segundo a teoria quântica, *nenhuma* propriedade é fisicamente real até ser observada. Como o isolado átomo emissor permaneceu inalterado, ele não registrou, ou "observou", a polarização particular dos fótons gêmeos que emitiu. Não existia, portanto, uma polarização particular como realidade física. Logo, antes de Alice observar a polarização do seu fóton, o fóton de Bob *não tinha* uma polarização. Mas, *instantaneamente* depois da observação distante de Alice, o fóton de Bob adquiriu uma polarização sem nenhuma força física envolvida. Esquisito.

EMBORA O COMENTÁRIO de Einstein "Deus não joga dados" seja fácil de entender e extremamente citado, a negação da realidade física pela teoria quântica é o que realmente incomodava Einstein. Seu dito espirituoso menos compreensível, na epígrafe deste capítulo, "Gosto de pensar que a Lua está lá mesmo que não esteja olhando para ela" capta sua objeção *séria*. Embora Einstein argumentasse em favor de um mundo real independente do observador, tinha mente aberta para uma revolução. Escreveu:

> É básico para a física que se assuma um mundo real com existência independente de qualquer ato de percepção – mas isso nós não *sabemos* [grifo do original].

EPR

O artigo EPR que chegou a Copenhague “como um raio do nada” tinha o título “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?” [Pode a descrição de realidade física feita pela mecânica quântica ser considerada completa?]. (Historiadores atribuíram a falta do artigo “*the*” no título do artigo ao fato de ele ter sido redigido por Podolsky, cujo polonês nativo não inclui artigos.) O texto do EPR falava de uma complexa combinação de posição e momento de duas partículas. Mas, ao falarmos em termos de fótons, nós a discutimos de maneira mais simples e mais moderna.

Segundo a teoria quântica fótons gêmeos têm polarizações *idênticas*, mas ela não inclui sua polarização *particular* como propriedade física real. Não obstante, alegava-se que a teoria quântica era uma teoria completa, uma teoria que descreve *todas* as propriedades fisicamente reais.

Para questionar essa alegação de completude, o EPR tinha de dizer o que constituía uma propriedade “fisicamente real”. Definir realidade tem sido há muito tempo, e ainda é, uma discutida questão filosófica. O EPR oferecia uma condição mínima para algo ser uma realidade física, e então argumentava que, se tal realidade física existisse e não fosse descrita pela teoria quântica, a teoria era incompleta. Eis a definição do EPR:

> Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, pudermos prever com certeza … o valor de uma grandeza física, então existe um elemento de realidade física correspondente a essa grandeza física.

Vamos dizer a mesma coisa em outras palavras: se uma propriedade física de um objeto pode ser conhecida *sem* que ele seja observado, então essa propriedade não pode ter sido criada pela observação. Se tal propriedade não foi *criada* pela observação, deve ter existido como realidade física *antes* da observação.

A teoria quântica não contém *nenhuma* propriedade física que seja real nesse sentido. Portanto, o EPR precisava exibir somente uma propriedade dessas como fisicamente real *antes* de ser observada para alegar que a teoria quântica era incompleta.

Essa propriedade seria a polarização particular de *um* fóton num par de fótons gêmeos. O EPR argumentava que essa polarização existia como realidade *antes* da observação. Vamos reformular concisamente esse argumento, mesmo que essencialmente tenha sido dado em nossa discussão de fótons gêmeos.

VOLTAMOS A ALICE e Bob, com Alice um pouco mais perto que Bob da fonte de fótons gêmeos. Ela portanto recebe seu fóton antes que Bob receba o gêmeo. Suponha que ela observe um fóton polarizado verticalmente; ele segue na Trajetória 1 dela. Ela *imediatamente* sabe que seu gêmeo, ainda a caminho de Bob, tem polarização vertical. Ela sabe que ele percorrerá a Trajetória 1 de Bob ao chegar ao polarizador dele.

Na verdade, seria possível a Bob capturar seu fóton com um par de caixas, uma alimentada pela Trajetória 1 e a outra pela Trajetória 2. Depois de capturado seu fóton, Alice poderia telefonar a Bob e lhe dizer com certeza em que caixa ele encontraria seu fóton.

A observação feita por Alice do seu fóton não poderia ter feito nada *físico* ao fóton de Bob. O fóton de Bob seguiu na direção dele a partir da fonte na velocidade da luz. Como nada pode viajar mais rápido que a luz, nada que Alice pudesse mandar atrás do fóton de Bob poderia alcançá-lo. Ela não poderia observá-lo. Quando Alice observou seu fóton, o de Bob ainda não havia chegado a ele. Bob, portanto, não poderia tê-lo observado.

Nem Alice nem Bob, nem ninguém, observou a polarização do fóton de Bob. Todavia, sua polarização não observada era conhecida por Alice com certeza.

E AÍ ESTÁ! Alice conhece com certeza a polarização do fóton de Bob sem observá-lo, sem ninguém observá-lo. Esse conhecimento atende ao critério do

EPR para que a polarização do fóton de Bob seja uma realidade física. Como a teoria quântica não inclui essa realidade física, o EPR argumentou que a teoria era incompleta. O artigo EPR terminava com a crença de que uma teoria completa é possível. Tal teoria completa presumivelmente daria uma imagem *razoável* do mundo, um mundo com existência independente da observação.

A resposta de Bohr ao EPR

Quando recebeu o artigo EPR, quase uma década depois que a interpretação de Copenhague tinha sido desenvolvida, Bohr ainda não se dera plenamente conta das implicações da teoria quântica, em particular, as implicações às quais o EPR objetava: que a observação, em si e por si, *sem qualquer perturbação física,* pode afetar instantaneamente um sistema físico remoto.

Bohr reconheceu o "raio" de Einstein como um sério desafio, e trabalhou furiosamente durante semanas para elaborar uma resposta. Alguns meses depois publicou um artigo exatamente com o mesmo título que o EPR: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" [Pode a descrição de realidade física feita pela mecânica quântica ser considerada completa?] (Ele chegou mesmo a deixar o "*the*" de fora.) Enquanto a resposta do EPR à pergunta-título do artigo era "não", a de Bohr foi um firme "sim". Era uma resposta largamente filosófica à preocupação científica do EPR. Bohr contestou o EPR com o que chamou de "revisão radical da nossa atitude com referência à realidade física".

Eis um trecho da longa resposta de Bohr. O texto transmite a essência do seu complexo argumento:

> [O] critério de realidade física proposto por Einstein, Podolsky e Rosen contém uma ambiguidade com referência ao significado da expressão "sem perturbar de forma alguma um sistema". É claro que num caso como o recém-considerado não há nenhuma questão de perturbação mecânica do sistema sob investigação durante o último estágio crítico do procedimento de medição. Mas mesmo nesse estágio há essencialmente uma questão de *influência das próprias condições que definem os tipos possíveis de previsões referentes ao comportamento futuro de um sistema*. Como essas condições constituem um elemento inerente à descrição de qualquer fenômeno ao qual o termo "realidade física" pode ser adequadamente vinculado, vemos que o argumento dos mencionados autores não justifica sua conclusão de que a descrição da mecânica quântica é essencialmente incompleta [grifo do original].

Na sua refutação do EPR, Bohr não questionou a lógica do argumento. Ele rejeitou seu ponto de partida, sua condição para alguma coisa ser uma realidade

física.

A condição de realidade do EPR assume tacitamente que, se dois objetos não exercem nenhuma força física entre si, o que acontece com um não pode de maneira alguma "perturbar" o outro. Sejamos específicos, considerando os fótons gêmeos de Alice e Bob: Alice, ao observar seu fóton, não pode exercer uma força física no fóton de Bob, que está se afastando dela na velocidade da luz. Portanto, segundo o EPR, ela não pode ter nenhum efeito sobre esse fóton.

Bohr concorda que não podia haver nenhuma perturbação "mecânica" do fóton de Bob provocada pela observação de Alice. (*Todas* as forças físicas estão inclusas no termo "mecânica", usado por Bohr.) No entanto, ele sustenta que, mesmo sem uma perturbação física, a observação remota de Alice "influencia" instantaneamente o fóton de Bob. E, segundo Bohr, isso constitui uma perturbação que viola a condição do EPR para a realidade. Só depois que Alice *observou* seu fóton como polarizado, digamos, verticalmente é que o fóton de Bob se polarizou verticalmente.

Como foi que a observação de Alice afetou o fóton de Bob? Será que algo feito num lugar distante, mesmo numa galáxia longínqua, pode *causar* instantaneamente algo que acontece aqui? Estritamente falando, não devemos dizer que sua observação "afetou" o fóton de Bob nem "causou" seu comportamento, porque nenhuma força física esteve envolvida. Usamos o misterioso termo santificado por Bohr: Alice "influenciou" o comportamento do fóton de Bob.

Embora Alice tenha influenciado instantaneamente o fóton de Bob, ela não pode comunicar qualquer informação a Bob mais depressa que o permitido pela velocidade da luz. Bob sempre vê uma série de polarizações aleatórias de fótons. Só quando Alice e Bob se juntam para comparar seus resultados é que eles veem que, sempre que ela via um fóton polarizado verticalmente, ele via o mesmo; sempre que ela via um fóton polarizado horizontalmente, ele via o mesmo.

PARA DEFENDER A TEORIA quântica a despeito dessa influência “não física”, Bohr mais tarde redefiniu o objetivo da ciência. Esse objetivo não é *explicar* a natureza, mas apenas descrever o que podemos *dizer* sobre a natureza. Em seus primeiros debates com Einstein, Bohr argumentava que qualquer observação perturba *fisicamente* aquilo que você observa com uma intensidade suficiente para impedir qualquer refutação da teoria quântica. Isso foi chamado de “doutrina da perturbação física”. Como a observação de Alice supostamente muda apenas o que pode ser *dito* sobre o fóton de Bob, a resposta de Bohr ao EPR foi chamada de “doutrina da perturbação semântica”.

Está tudo muito confuso? Pode apostar que sim! Não há meio de o EPR e a resposta de Bohr serem enunciados corretamente sem que seja confuso ou soe místico.

EINSTEIN REJEITOU A resposta de Bohr. Ele insistia que existia um mundo real lá fora. A meta da ciência deve ser tentar *explicar* a natureza, não simplesmente contar o que podemos *dizer* sobre a natureza. Um fóton mostrava uma polarização particular, argumentava Einstein, porque aquele fóton realmente *tinha* uma polarização. Ele insistia que objetos têm propriedades físicas independentes de sua observação. Se qualquer dessas propriedades, posteriormente chamadas “variáveis ocultas”, não estivesse incluída na teoria quântica, a teoria estaria incompleta. Einstein ironizou as “influências” de Bohr como sendo “forças de vodu” e “ações fantasmagóricas”. Não podia aceitar tais coisas como parte do funcionamento do mundo, dizendo: “O Senhor é sutil, mas malicioso Ele não é.”

Devemos deixar claro que Bohr e Einstein concordavam quanto aos *resultados* reais de um experimento EPR, as observações de Alice e Bob que descrevemos. Simplesmente *interpretavam* esses resultados de forma diferente. É por isso que ninguém realmente *fez* um experimento EPR. Todos os físicos sabiam qual seria o resultado. A discussão Einstein-Bohr era encarada como “meramente filosófica”.

EINSTEIN SEMPRE TEVE dúvidas quanto à teoria quântica; Bohr foi seu mais ferrenho defensor. É justo especular por que Einstein e Bohr apegavam-se com tanta força a suas posições filosóficas. Lembremos que durante quase vinte anos a comunidade física rejeitou a proposta do quantum do jovem Einstein de que a luz vinha em fótons – ela foi chamada de "temerária". Em contraste, a proposta inicial de Bohr de um efeito quântico lhe trouxe consagração imediata. Em que medida suas experiências profissionais com a teoria quântica teriam moldado suas atitudes vida afora?

Einstein achava que os físicos rejeitariam os argumentos com que Bohr refutou o EPR. Ele se enganou. A teoria quântica funcionava bem demais. Ela forneceu uma base para o progresso rápido na física e suas aplicações práticas. Físicos trabalhando tinham pouca inclinação para questões filosóficas. Nos trinta anos depois da publicação do EPR em 1935, o artigo foi essencialmente ignorado. Era citado em média apenas uma vez por ano. A partir do teorema de Bell (abordado em nosso próximo capítulo) isso mudou. Entre 2002 e 2006, o EPR foi citado mais de duzentas vezes por ano, e o interesse aumenta. Nos dias de hoje o EPR é provavelmente o artigo de física da primeira metade do século XX mais citado.

Nas duas décadas que viveu após o EPR, Einstein nunca vacilou em sua convicção de que havia mais a dizer do que a teoria quântica havia contado. E instou seus colegas a não desistir da busca dos segredos do "Velho". Mas pode ter ficado desencorajado. Numa carta a um colega, escreveu: "Andei pensando melhor. Talvez Deus *seja* malicioso."

EXPERIMENTOS MOTIVADOS PELO EPR estabeleceram agora a existência efetiva das "ações fantasmagóricas" que incomodavam Einstein. Atualmente nos referimos a elas como "emaranhamentos". Laboratórios industriais trabalham com emaranhamentos como base para computadores quânticos. Mesmo assim, ainda são "fantasmagóricas". E são o tema de nosso próximo capítulo.

13. Ações fantasmagóricas
Teorema de Bell

… não podeis agitar uma flor
Sem perturbar uma estrela.

FRANCIS THOMPSON

OS FÍSICOS PRESTARAM pouca atenção ao EPR, ou à resposta de Bohr. Se a mecânica quântica era completa ou não, não tinha importância. Ela *funcionava*. Nunca fez uma previsão errada e os resultados práticos abundavam. Quem se importava se os átomos careciam de “realidade física” antes de serem observados? Físicos em atividade tinham pouco tempo para uma “questão meramente filosófica” impossível de ser respondida.

Pouco depois do EPR, os físicos, voltando suas atenções para a Segunda Guerra Mundial, desenvolveram o radar, a espoleta de proximidade e a bomba atômica. Então vieram os politicamente e socialmente conservadores anos 1950. Nos departamentos de física uma mentalidade conformista significava que um membro do corpo docente sem estabilidade podia pôr sua carreira em risco questionando seriamente a interpretação ortodoxa da mecânica quântica. Mesmo hoje é melhor explorar o significado da mecânica quântica só quando também se está trabalhando “de dia” num tópico da corrente principal da física. Desde o teorema de Bell, porém, os físicos, especialmente os mais jovens, mostram um crescente interesse naquilo que a mecânica quântica está nos dizendo.

O teorema de Bell tem sido chamado de “a mais profunda descoberta em ciência da segunda metade do século XX”. Ele esfregou no nariz dos físicos a estranheza da mecânica quântica. O teorema de Bell e os experimentos que ele estimulou responderam no laboratório o que era supostamente uma “questão meramente filosófica”. Sabemos que as “ações fantasmagóricas” de Einstein

existem sim. Até mesmo eventos nas fronteiras da galáxia influenciam instantaneamente o que acontece nos limites do seu jardim. Imediatamente enfatizamos que tais influências são indetectáveis em qualquer situação de complexidade normal.

No entanto, as atualmente chamadas “influências EPR-Bell”, ou emaranhamentos, recebem atenção em laboratórios industriais por seu potencial de viabilizar computadores incrivelmente potentes. Elas já fornecem a encriptação mais segura para comunicação confidencial. O teorema de Bell renovou o interesse pelos fundamentos da mecânica quântica e revela de modo impressionante o encontro da física com a consciência.

John Stewart Bell

John Bell nasceu em Belfast em 1928. Embora ninguém na família jamais tivesse tido sequer educação secundária, sua mãe promoveu o estudo como forma de ter uma vida boa, na qual "podiam-se vestir roupas de domingo a semana toda". Seu filho tornou-se um estudante entusiasmado e, segundo sua própria avaliação, "não necessariamente o mais inteligente mas entre os três ou quatro melhores". Ávido por conhecimento, Bell passava o tempo na biblioteca em vez de sair com os outros rapazes, o que teria feito se fosse, como ele mesmo diz, "mais gregário, mais inserido socialmente".

Bem cedo Bell foi atraído pela filosofia. Mas, descobrindo que cada filósofo era contradito por outro, passou para a física, onde "podia-se chegar razoavelmente a conclusões". Bell estudou física na Queen's, a universidade local. Em mecânica quântica, foi o aspecto filosófico que mais lhe interessou. Para ele, os cursos concentravam-se demais nos aspectos práticos da teoria.

Ainda assim, Bell acabou indo trabalhar numa função praticamente de engenharia, o projeto de aceleradores de partículas, e por fim no Cern (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire – Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, antigo Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) em Genebra. Mas também produziu um importante trabalho em física teórica. Casou-se com uma colega física, Mary Ross. Apesar de trabalharem independentemente, Bell escreve que, olhando para sua coletânea de artigos, "eu a vejo em toda parte".

No Cern, Bell concentrou-se na corrente principal da física, naquilo que sentia ser pago para fazer, e que seus colegas aprovavam. Restringiu seu interesse pela estranheza da mecânica quântica durante anos, mas por fim acabou tendo uma oportunidade de explorar essas ideias durante seu ano sabático, em 1964. "Estar longe das pessoas que me conheciam deu-me mais liberdade, então

gastei algum tempo com essas questões quânticas”, conta ele. O portentoso resultado é o que agora chamamos de “teorema de Bell”.

FIGURA 13.1 John Bell. © Renate Bertlmann 1980. Cortesia Springer Verlag.

Eu (Bruce) dividi um táxi e uma conversa com John Bell em 1989 a caminho de uma pequena conferência em Erice, na Sicília, que focalizou seu trabalho. Na conferência, com senso de humor e seu sotaque irlandês, ele enfatizou com firmeza a profundidade do enigma quântico não solucionado. Em letras garrafais no quadro-negro ele apresentou sua famosa abreviação Fapp, “*for all practical purposes*” [“para todos os propósitos práticos”], e alertou contra o Fapptrap [a cilada de Fapp]: aceitar uma mera solução Fapp para o enigma. Como chefe de departamento na época, pude convidar Bell a passar algum tempo em nosso

departamento de física na Universidade da Califórnia em Santa Cruz, e ele em princípio aceitou. Mas no ano seguinte John Bell morreu subitamente.

A motivação de Bell

Lembremos que o EPR aceitava como corretas todas as previsões da teoria quântica. Ele questionava sua completude. Argumentava que a realidade criada pelo observador defendida pela teoria surgia devido ao fato de ela não incluir propriedades fisicamente reais de objetos, as "variáveis ocultas". O argumento EPR começava com a "óbvia" premissa implícita de que o comportamento de objetos só podia ser afetado por forças físicas. Como nenhum efeito físico pode viajar mais rápido que a velocidade da luz, dois objetos podiam estar separados de tal maneira que o comportamento de um não podia afetar o outro num tempo menor do que levaria para a luz percorrer a distância de um ao outro. O argumento EPR para a realidade *assumia* a separabilidade.

Ao refutar o EPR, Bohr *negou* a separabilidade. Argumentou que o que acontecia com um objeto podia de fato "influenciar" o comportamento do outro *instantaneamente*, mesmo que não houvesse força física conectando ambos. Einstein ridicularizou as "influências" de Bohr chamando-as de "ações fantasmagóricas", "*spukhafte Fernwirkung*" no original alemão.

Durante trinta anos, nenhum resultado experimental foi capaz de decidir entre as variáveis ocultas supostamente reais fisicamente de Einstein e as "influências" instantâneas de Bohr. Além disso, os físicos aceitavam tacitamente um teorema matemático que se propunha a mostrar ser *impossível* para uma teoria que incluísse variáveis ocultas reproduzir as predições da teoria quântica. Era um teorema que cortava pela raiz o argumento de Einstein em favor de variáveis ocultas.

Enquanto John Bell desfrutava da sua liberdade sabática para explorar tais coisas, foi atingido por um *contraexemplo* do teorema "nada de variáveis ocultas". Ele descobriu que, doze anos antes, David Bohm havia desenvolvido

uma teoria que *incluía* variáveis ocultas e mesmo assim reproduzia as predições da mecânica quântica. “Eu vi o impossível feito”, disse Bell.

Depois de descobrir onde o teorema “nada de variáveis ocultas” estava errado, Bell ponderou: já que variáveis ocultas *podem* existir, será que *realmente* existem? Como pode um mundo com propriedades tão reais, independentes do observador, diferir do mundo descrito pela teoria quântica? Bell queria entender o que *significam* realmente os cálculos quânticos feitos pelos físicos. Ele escreveu: “Você pode andar de bicicleta sem saber direito como ela funciona … Da mesma forma que nós [habitualmente] fazemos física teórica. Eu quero achar o manual de instruções para dizer o que realmente estamos fazendo.”

O teorema de Bell

Como o argumento EPR não questionava nenhuma das *previsões* da teoria quântica, ele não confrontava a teoria com nenhum desafio experimental. Bell desafiou sim a teoria. Deduziu uma previsão experimentalmente *testável* que *tinha de ser* verdadeira em *qualquer* mundo que incluísse realidade independente do observador e separabilidade. A teoria quântica *nega* tal realidade e separabilidade. A previsão testável de Bell foi um “espantalho” que ele criou para os experimentos tentarem derrubar. Se o espantalho de Bell *sobrevivesse* ao desafio experimental, a teoria quântica deveria revelar-se errada.

O teorema de Bell em poucas palavras: suponha que nosso mundo tenha propriedades físicas reais que *não* são criadas pela observação. E suponha, além disso, que dois objetos possam ser separados um do outro de modo que o que acontece com um deles não possa afetar o outro instantaneamente. (Em suma, chamaremos essas duas suposições de “realidade” e “separabilidade”.) A partir dessas duas premissas *apenas* – ambas assumidas em física clássica, mas negadas pela teoria quântica –, Bell deduziu que certas grandezas observáveis não podiam ser maiores que outras. Essa previsão *experimentalmente testável* do teorema de Bell, que *deve* ser verdadeira em qualquer mundo com realidade e separabilidade, é a “desigualdade de Bell”.

Se for descoberto que a desigualdade de Bell é falsa em *qualquer* situação, uma ou ambas as premissas que levam logicamente a ela (realidade e separabilidade) *devem* ser falsas. Portanto, se em nosso mundo concreto a desigualdade de Bell for *alguma* vez violada, *nenhum* objeto com realidade e separabilidade poderia existir nele. (Bell esperava que a desigualdade fosse violada, como prevê a teoria quântica.)

As grandezas mais comumente observadas usadas para testar a desigualdade de Bell são os índices com que os fótons gêmeos exibem diferentes polarizações

quando polarizadores são dispostos em diferentes ângulos. Mas, por enquanto, sejamos mais genéricos.

TUDO ISSO É BASTANTE abstrato. Filósofos e místicos têm falado de realidade e separabilidade (ou seu oposto, “conectividade universal”) há milênios. A mecânica quântica coloca esses dois aspectos cruamente diante de nós. E o teorema de Bell permite que sejam testados.

Naquilo que poderíamos chamar de mundo “razoável”, os objetos devem ter propriedades fisicamente reais (propriedades que não são meramente criadas pela observação). Mais ainda, num mundo razoável, os objetos devem ser separados. Isto é, afetam-se mutuamente apenas por forças físicas, que não podem viajar mais depressa que a velocidade da luz (não por “ações fantasmagóricas” viajando infinitamente depressa). O mundo newtoniano descrito pela física clássica é, nesse sentido, um mundo razoável. O mundo descrito pela teoria quântica *não* é. O teorema de Bell permite um teste para verificar se talvez apenas a *descrição* quântica não seja razoável, e nosso mundo concreto de fato seja razoável.

Não vamos ficar fazendo suspense. Quando os experimentos foram feitos, a desigualdade de Bell foi violada; as premissas de realidade e separabilidade produziram uma previsão *errada* para o nosso mundo. O espantalho de Bell foi derrubado – como ele esperava que fosse. Portanto, o nosso mundo *não tem* simultaneamente realidade e separabilidade. E, nesse sentido, é um mundo “não razoável”.

Imediatamente admitimos não compreender o que poderia significar um mundo que carece de “realidade”. Até mesmo o que pode significar em si “realidade”. Na verdade, até se discute se a realidade é de fato requerida ou não como premissa no teorema de Bell. No entanto, não precisamos lidar com isso agora. Para *nossa* dedução de uma desigualdade de Bell, assumimos diretamente um mundo real. Mais tarde, quando discutirmos as consequências da violação da desigualdade de Bell em nosso mundo concreto, definiremos uma “realidade”

implicitamente aceita pela maioria dos físicos. E isso vai nos deixar com um mundo estranhamente conectado.

Dedução de uma desigualdade de Bell

Oferecemos uma dedução da desigualdade de Bell com objetos ligeiramente *parecidos* com fótons gêmeos. Vamos chamar nossos objetos de “phótons”. Cada um dos nossos phótons gêmeos tem um “ângulo de polarização” fisicamente real, simplesmente chamado de “polarização”. Além disso, os phótons gêmeos podem ser separados de modo que o que ocorre com um não pode afetar instantaneamente o outro. Nossos phótons claramente *não* são os fótons da teoria quântica, que *nega* tal realidade e separabilidade.

Será que os fótons que fazem clicar contadores Geiger em nosso mundo concreto possuem a realidade e a separabilidade dos nossos phótons, negadas pela teoria quântica? Isso é algo que os experimentos com fótons de verdade precisam decidir.

Para ser claros, apresentaremos uma imagem mecânica específica. No entanto, a lógica que usamos *não depende de forma nenhuma de nenhum aspecto desse modelo mecânico*, com exceção da realidade da polarização de cada phóton e de sua separabilidade de seu gêmeo. O tratamento matemático de Bell era completamente genérico. Nem sequer especificava fótons.

Se você apenas passar os olhos por nossa dedução pictórica da desigualdade de Bell e simplesmente aceitar o resultado, não terá muita dificuldade de compreender o resto do livro. Para uma leitura rápida, você pode até mesmo pular todo esse trecho e ir direto para a parte onde apresentamos “uma história intencionalmente ridícula” (ver aqui e a figura 13.6).

Um modelo explícito

Nas figuras 13.2, 3, 4 e 5 apresentamos uma imagem mecânica específica. Para mostrar a polarização assumida por cada phóton como algo graficamente real,

representamos o phóton por um “tracinho”; o ângulo aleatório do traço é a sua polarização. Retratar phótons como tracinhos necessariamente exibe propriedades além da sua polarização. Essas propriedades, o comprimento ou largura do tracinho, por exemplo, são irrelevantes para nossa dedução. Apenas a polarização fisicamente real do phóton é relevante. Essa é a nossa premissa de realidade. Sua polarização determina qual trajeto o phóton percorrerá ao encontrar um “polarizador”.

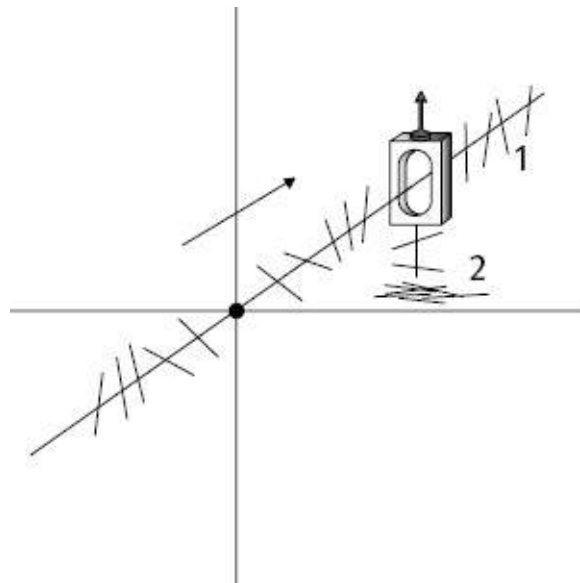



FIGURA 13.2 Um modelo de phótons-tracinhos e um polarizador oval.

O “polarizador” desse modelo mecânico é uma placa com uma abertura oval cuja dimensão maior é o “eixo de polarização”. Um phóton cuja direção de polarização é próxima ao eixo do polarizador passará por ele para percorrer a Trajetória 1. Um phóton cuja polarização não é próxima atingirá o polarizador para percorrer a Trajetória 2.

Este modelo mecânico poderia, em princípio, explicar adequadamente todo o comportamento da luz polarizada, mas não precisa fazer isso. Nossa lógica não depende de nada em relação a esses phótons, salvo sua realidade e separabilidade.

DESCREVEREMOS QUATRO EXPERIMENTOS mentais “Alice e Bob”. Eles são muito parecidos com o experimento EPR descrito no capítulo 12. (Na verdade, os experimentos do teorema de Bell são às vezes imprecisamente mencionados como experimentos EPR.) Mas há uma grande diferença: no caso EPR, as “variáveis ocultas” de Einstein e as “influências” de Bohr levavam ao *mesmo* resultado experimental previsto. A discordância entre Bohr e Einstein era apenas uma diferença de *interpretação*. Em nosso modelo, e nos experimentos reais do teorema de Bell, os resultados para as “variáveis ocultas” de Einstein e para as “influências” de Bohr são diferentes.

Em cada um de nossos quatro experimentos “Alice e Bob”, phótons gêmeos com polarizações idênticas, mas aleatórias, são emitidos em sentidos opostos de uma fonte entre Alice e Bob. Como os phótons gêmeos se afastam um do outro na velocidade da luz, nada físico pode ir de um experimentador a outro no tempo entre as chegadas dos phótons a seus respectivos polarizadores. Portanto, o que acontece com um dos nossos phótons num polarizador não pode afetar seu gêmeo no outro. Essa é a nossa premissa de separabilidade.

Como no caso EPR, Alice e Bob identificam dois phótons como sendo gêmeos pelos seus instantes de chegada simultâneos e verificam qual dos detectores, da Trajetória 1 ou da Trajetória 2, registrou cada phóton.

Experimento I

Neste primeiro experimento, como no experimento EPR original, Alice e Bob têm cada um seu eixo de polarização alinhado verticalmente. Eles anotam “1” toda vez que o detector da Trajetória 1 registra um phóton e “2” toda vez que o detector da Trajetória 2 faz o registro. Cada um deles termina com uma longa tira de 1s e 2s aleatórios.

Depois de registrar um grande número de phótons, Alice e Bob se reúnem e comparam os resultados. Descobrem que seus dados têm uma sequência idêntica. O phóton de Bob percorreu o mesmo trajeto na sua polarização que seu

gêmeo na polarização de Alice. Isso confirma que os phótons que chegam simultaneamente são gêmeos.

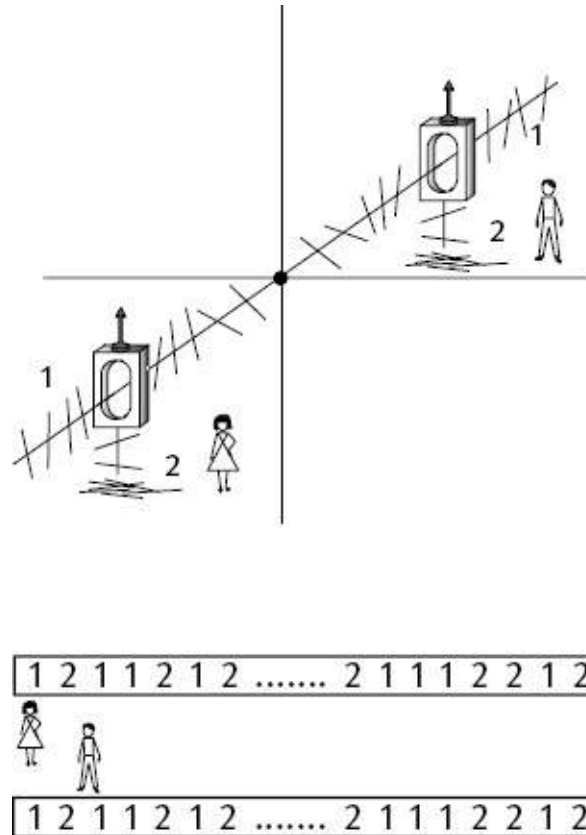



FIGURA 13.3 Experimento I: os polarizadores estão alinhados e os dados de Alice e Bob são idênticos.

Alice e Bob esperavam essa concordância perfeita. Um par de phótons gêmeos realmente *tinha* polarização idêntica. Nesse modelo com realidade os phótons foram *criados* com polarizações idênticas. (Na teoria quântica, em que a polarização é criada pelo *observador*, a concordância precisa ser explicada por uma "influência" exercida instantaneamente sobre um fóton pela observação de seu gêmeo distante.)

Experimento II

É igual ao Experimento I, exceto que desta vez Alice gira seu polarizador por um pequeno ângulo que chamaremos de Q (a letra grega teta). Bob mantém o

eixo do seu polarizador na vertical.

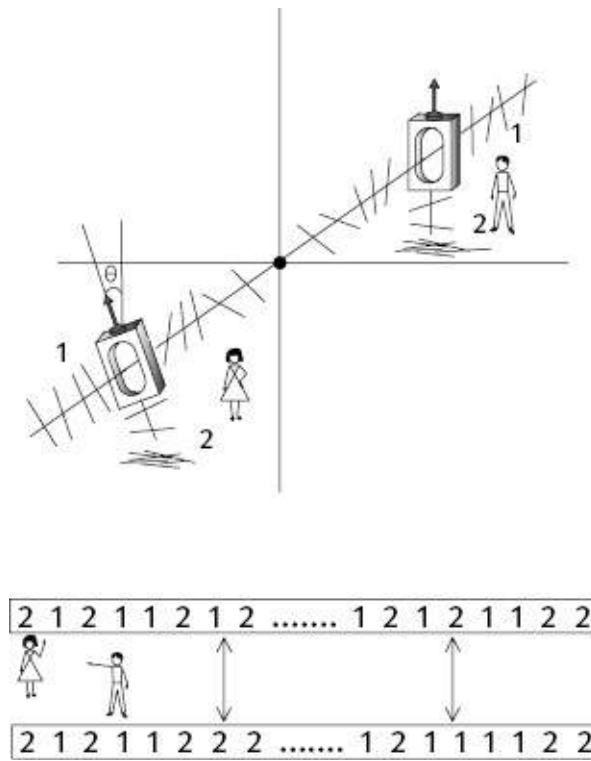



FIGURA 13.4 Experimento II: o polarizador de Alice é girado, provocando falta de concordância.

Ambos os experimentadores anotam novamente o mesmo tipo de dados. A polarização dos phótons não é afetada pela escolha de Alice de um novo eixo de polarização. Portanto, alguns phótons que *teriam* atravessado o polarizador de Alice na sua Trajetória 1, caso ela não o tivesse girado, agora percorrem sua Trajetória 2, e vice-versa. Segundo nossa premissa de separabilidade, os phótons de Bob não são afetados pela rotação do polarizador de Alice nem pelo trajeto percorrido pelos seus gêmeos no polarizador de Alice.

Alice e Bob, reunindo-se desta vez para comparar seus dados, descobrem alguns que não estão combinando. Essas divergências ocorrem, por exemplo, quando alguns dos phótons de Alice que teriam percorrido a Trajetória 1 se ela não tivesse girado o polarizador percorreram a sua Trajetória 2. Seus gêmeos, porém, no polarizador de Bob, continuaram percorrendo a Trajetória 1 dele. A porcentagem de disparidades seria pequena para um ângulo Q pequeno.

Digamos, por exemplo, que Alice mudou o que teria acontecido para 5% de seus phótons. Logo, ela causou uma taxa de descombinação de 5%.

Experimento III

É exatamente igual ao Experimento II, só que desta vez é Bob quem gira seu polarizador num ângulo Q, enquanto Alice retorna o seu para a posição vertical. Como as situações são simétricas, a taxa de descombinação seria novamente de 5%, presumindo que o número de pares de phótons fosse grande o suficiente para o erro estatístico ser desprezível.

Experimento IV

Desta vez ambos, Alice e Bob, giram seus polarizadores num ângulo Q. Se ambos girassem no mesmo sentido, isso corresponderia a nenhuma rotação; seus polarizadores ainda estariam alinhados. Assim sendo, ambos giram seus polarizadores num ângulo Q em sentidos opostos.

Alice, ao girar seu polarizador num ângulo Q, muda o comportamento dos seus phótons no mesmo valor que no Experimento II. Ela muda o que teria acontecido com 5% dos seus phótons. A situação é simétrica. A rotação do polarizador de Bob num ângulo Q muda o comportamento de 5% de seus phótons em relação ao que poderia ter ocorrido.

Como Alice e Bob mudaram ambos o comportamento de 5% de seus phótons, e como cada mudança poderia se mostrar como diferença quando as suas sequências de dados fossem comparadas, seria de se esperar uma taxa de descombinação de 10%. Não há como obter uma taxa de descombinação *maior* numa amostra estatisticamente grande.

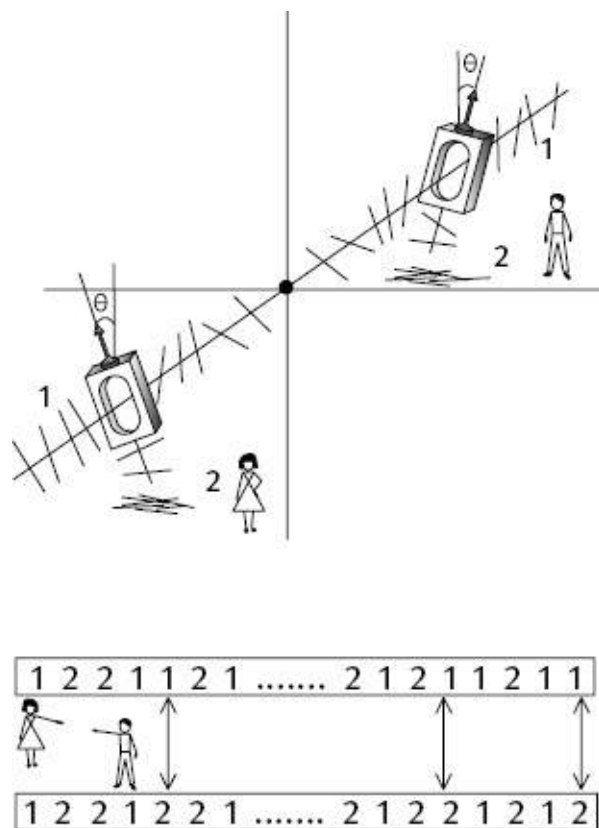



FIGURA 13.5 Experimento IV: Os polarizadores de Alice e Bob são ambos girados e as descombinações se devem a ambas as rotações.

Poderíamos, no entanto, obter uma taxa de descombinação *menor*. Eis como: é provável que, para alguns pares de phótons gêmeos, tanto Alice como Bob tenham, *cada um*, causado uma mudança de comportamento no gêmeo. Os dois phótons desse par de gêmeos iriam portanto comportar-se de maneira idêntica. Os dados para tais pares de gêmeos não seriam registrados como descombinação.

Como exemplo dessa mudança dupla de comportamento, considere phótons gêmeos quase verticais que tivessem ambos percorrido a Trajetória 1 nos polarizadores de Alice e Bob e houvessem ambos permanecido com eixo de polarização na vertical. Se Alice e Bob girarem seus polarizadores em sentidos opostos, como aconteceu no Experimento IV, poderiam ambos mandar esse par de gêmeos percorrer a Trajetória 2. Portanto, não registrariam essa dupla mudança como descombinação.

Por causa dessas mudanças duplas, quando Alice e Bob compararem suas sequências de dados no Experimento IV, a taxa de descombinação provavelmente será *menor* que os 5% da taxa causada por Alice sozinha *mais* os 5% da taxa de descombinação causada por Bob sozinho. No Experimento IV a taxa de descombinação constatada provavelmente será *menor* que 10%. Numa amostra estatística grande ela *não pode* ser maior.

E AÍ ESTÁ! Deduzimos uma desigualdade de Bell:

> A taxa de descombinação quando ambos os polarizadores são girados num ângulo Q (em sentidos opostos) é igual a ou menor que o dobro da taxa de descombinação para a rotação Q de um único polarizador.

Como o espaço é o mesmo em todas as direções, uma rotação de Q dos dois polarizadores em sentidos opostos é equivalente a uma rotação de 2Q de apenas um deles. Logo, girar Q um único polarizador em um experimento e 2Q num segundo experimento pode demonstrar a mesma desigualdade. A desigualdade de Bell afirmaria então: uma rotação de 2Q não pode produzir mais descombinação do que o dobro de descombinação para uma rotação de Q.

EIS UMA HISTÓRIA intencionalmente ridícula, que enfatiza que as *únicas* premissas em nossa dedução de uma desigualdade de Bell foram a realidade e a separabilidade. Poderíamos, em vez de falar de phótons-tracinhos e polarizadores ovais, ter simplesmente dito que cada phóton é guiado por um pequeno “piloto de phóton” e que um polarizador é simplesmente uma placa de trânsito indicando a “orientação” com uma seta. O piloto de phóton leva consigo um documento de viagem que o instrui a virar o volante do phóton para a Trajetória 1 ou a Trajetória 2 dependendo da placa de trânsito. A variável oculta é agora a instrução fisicamente real impressa no documento de viagem do piloto. Sua irmã, pilotando o phóton gêmeo, segue instruções idênticas ao encontrar sua placa de trânsito, sem levar em consideração a conduta do irmão. Esse modelo

produz a mesma desigualdade de Bell. Basta supor apenas realidade e separabilidade.

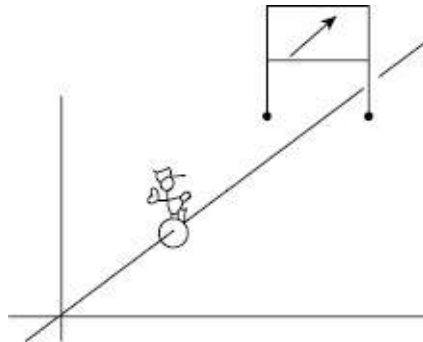



FIGURA 13.6 O piloto de phóton.

SUPONHA QUE DADOS experimentais *reais violassem* a desigualdade de Bell que acabamos de deduzir. Ou seja, suponha que em experimentos de laboratório com fótons gêmeos reais a taxa de descombinação para a rotação de ambos os polarizadores fosse *maior* que o dobro da taxa de descombinação para a rotação de um só polarizador. Como a desigualdade de Bell, dizendo que *não* pode ser maior, foi deduzida pressupondo *apenas* realidade e separabilidade, sua violação significaria que uma das premissas, ou ambas, *tinha* de estar errada. Significaria que nosso mundo concreto carece ou de realidade ou de separabilidade, ou de ambas. Veremos que uma violação em qualquer um dos casos (fótons gêmeos efetivamente existentes, por exemplo) significa falta de realidade ou separabilidade para tudo com que tais fótons possam possivelmente interagir. Em princípio, isso é qualquer coisa. (Neste caso, usamos a expressão "efetivamente existentes", em vez da palavra traiçoeira "real",[c] para nos referir ao mundo em que vivemos e os fótons com os quais lidamos.)

Se a desigualdade de Bell *não* fosse violada, teria sido demonstrado que a teoria quântica, que *prediz* uma violação, está errada. Mas nada seria provado acerca da realidade ou da separabilidade. Premissas incorretas podem levar a *algumas* previsões corretas. Na verdade, em algumas situações, a desigualdade de Bell não é violada. Sua violação em *qualquer* situação é suficiente para negar que nosso mundo existente tem tanto realidade quanto separabilidade.

Os testes experimentais

Em 1965, quando o teorema de Bell foi publicado, era uma ligeira heresia um físico questionar a teoria quântica ou mesmo duvidar que a interpretação de Copenhague resolvesse todas as questões filosóficas. Mesmo assim, no fim dos anos 1960, John Clauser, um estudante de pós-graduação em física da Universidade de Colúmbia, ficou intrigado.

Viajando para Berkeley como pós-doc para trabalhar em radioastronomia com Charles Townes, Clauser apresentou sua ideia para um teste da desigualdade de Bell. Townes o liberou de seu compromisso com o trabalho em astronomia e até mesmo manteve seu apoio financeiro. Com equipamento emprestado, Clauser e um aluno de pós-graduação mediram o que chamamos de "taxa de descombinação" para fótons gêmeos com polarizadores montados em diferentes ângulos um em relação ao outro. Em essência, fizeram de fato os experimentos "Alice e Bob". E descobriram que a desigualdade de Bell era *violada*. Violada exatamente da maneira que a teoria quântica prevê.

Para evitar uma afirmação errônea comum, enfatizamos que a *desigualdade* de Bell foi violada. O *teorema* de Bell, a dedução da desigualdade a partir das premissas de realidade e separabilidade, é uma prova matemática não sujeita a teste experimental.

A teoria quântica prevê exatamente o quê?

A determinação de *quanto* a desigualdade de Bell, segundo a teoria quântica, é violada requer cálculos bastante complexos, não particularmente relevantes para nossa discussão. No entanto, para aqueles que queiram explorar esse ponto, diremos um pouco mais, mas o próximo parágrafo *pode muito bem ser pulado*.

Um cálculo semiclássico, considerando a luz como um campo elétrico, dá a resposta correta para a taxa de descombinação, mesmo que não possa lidar com as correlações de fótons necessárias para estabelecer o *significado* da desigualdade de Bell. Anotamos aqui, sem muitas explicações, os seguintes fatos: (1) A observação feita por Alice de que um fóton passando pelo seu polarizador, digamos, vertical significa que seu gêmeo no polarizador de Bob será vertical. (2) A fração da intensidade luminosa (ou fótons) que *não* passa pelo polarizador de Bob – a taxa de descombinação – é proporcional ao quadrado da componente do campo elétrico perpendicular ao eixo do seu polarizador. (3) Essa fração é proporcional ao quadrado do seno do ângulo Q do polarizador de Bob em relação ao de Alice (lei de Malus). Logo, a taxa de descombinação efetivamente observada – e também dada pela teoria quântica – é proporcional a $\text{sen}^2(Q)$. (4) A desigualdade de Bell que deduzimos afirma, portanto: $2\text{sen}^2(Q) \geq \text{sen}^2(2Q)$. Experimente para $Q = 22{,}5°$, $2Q = 45°$. Obtemos $0{,}3 \geq 0{,}5$. Muito errado. Vemos assim que no mundo concreto a desigualdade de Bell pode ser fortemente violada. Repetimos: este parágrafo pode ser pulado.

O que deve ser ressaltado nos resultados experimentais

Os experimentos de Clauser excluíram o que é às vezes chamado de “realidade local” ou “variáveis ocultas locais”. Os experimentos demonstraram que as propriedades do nosso mundo têm apenas uma realidade criada pela observação *ou* que existe uma conectividade além daquela mitigada pelas forças físicas comuns, ou ambas as coisas.

Clauser escreve: “Minhas próprias … esperanças vãs de derrubar a mecânica quântica foram abaladas pelo dados.” Em vez disso, ele confirmou a violação da desigualdade de Bell prevista pela teoria quântica. Em seus experimentos, a teoria quântica sobreviveu ao seu mais sério desafio em décadas.

Nunca podemos ter certeza de que uma teoria científica específica esteja correta. Algum dia uma teoria melhor poderá superar a teoria quântica. Mas agora sabemos que qualquer teoria melhor também precisa descrever um mundo que não tem ao mesmo tempo realidade e separabilidade. Antes do resultado de Clauser, não podíamos saber disso.

Infelizmente para Clauser, no começo da década de 1970, a investigação dos fundamentos da mecânica quântica ainda não era considerada física respeitável na maioria dos lugares. Quando buscou uma posição acadêmica (inclusive uma possibilidade em nosso próprio departamento, na Universidade da Califórnia em Santa Cruz), seu trabalho foi recebido com desdém. “O que ele fez além de checar a teoria quântica? Todos nós *sabemos* que está certa!”, era a típica manifestação equivocada em relação à realização de Clauser. Ele conseguiu um emprego em física, mas não um que lhe permitisse participar das amplas investigações que deflagrou.

Uma década depois, Alain Aspect, na França, aprimorou o teste da desigualdade de Bell elaborado por Clauser. Com a eletrônica extremamente rápida disponível, ele pôde assegurar que o tempo entre a detecção de um fóton e

a de seu gêmeo seria menor que o tempo que levaria para a luz viajar de um aparelho de detecção a outro. Portanto, como nenhuma força física pode se propagar mais depressa que a velocidade da luz, nenhum efeito físico da observação de um fóton poderia afetar a do seu gêmeo. Isso fechou um pequeno furo no experimento feito por Clauser, cuja eletrônica não era rápida o bastante.

Aspect relata que, quando contou seus planos a Bell, a primeira pergunta dele foi: “Você tem estabilidade como professor?” A exploração dos fundamentos da mecânica quântica era mais aceitável do que uma década antes, mas ainda devia ser enfrentada com cuidado, em termos de carreira. Os resultados finais de Aspect não só fecharam o furo no experimento de Clauser como produziram uma confirmação surpreendentemente forte da violação da desigualdade de Bell, precisamente da maneira que a teoria quântica predizia. Se John Bell não tivesse morrido, Bell, Clauser e Aspect poderiam muito bem ter compartilhado um prêmio Nobel.

O resultado de Aspect não será o fim da história. Nas palavras de Bell:

> É um experimento muito importante, e talvez marque o ponto em que se deveria parar e pensar por algum tempo, mas certamente espero que não seja o fim. Penso que a sondagem do que a mecânica quântica significa deve continuar, e na verdade continuará, quer concordemos ou não que valha a pena, porque muita gente está suficientemente fascinada e perturbada por ela para continuar.

Mais de duas décadas depois de sua previsão, a pesquisa atual sobre o significado da mecânica quântica confirma o *insight* de Bell.

Onde nos deixa a violação da desigualdade de Bell?

Primeiro a realidade

"Realidade" tem sido nosso termo simplificado para a existência de propriedades fisicamente reais que *não* são criadas pela observação. A teoria quântica não inclui tal realidade. A natureza da realidade física tem sido discutida no mínimo desde os tempos de Platão, em 400 a.C. E ainda é. Em particular, debate-se se o teorema de Bell de fato presume ou não a realidade. (Se a realidade não for uma das premissas do teorema, os resultados experimentais negarão a separabilidade para nosso mundo efetivamente existente, não negariam apenas a coexistência de realidade *e* separabilidade.)

(Este parágrafo técnico pode ser pulado. A dedução matemática de Bell inclui um símbolo, λ, a letra grega lambda, que representa *tudo* existente no passado que poderia afetar resultados na observação de Alice sem afetar os de Bob, e vice-versa. Se λ inclui polarizações efetivas para os fótons incidentes, a realidade das propriedades de objetos específicos é uma premissa do teorema de Bell. Se, porém, λ se refere a *todos os possíveis* aspectos das observações, inclusive, digamos, aspectos dos polarizadores, mas não polarizações de fótons como propriedades individuais, o postulado da realidade aplicado a objetos específicos é negável. Em nossa dedução pictórica de uma desigualdade de Bell, em que Alice e Bob observaram ângulos de polarização de fótons, os objetos tinham uma realidade direta.)

Para buscar um argumento de realidade, vamos assumir agora uma separabilidade *completa*, que *nada* que Alice pudesse fazer (*inclusive* quaisquer "influências" mais rápidas que a luz) poderia ter *algum* efeito nos resultados no polarizador de Bob. Vamos aceitar também uma definição de realidade física no espírito do EPR: se uma propriedade de um objeto pode ser conhecida sem

qualquer observação dela, essa propriedade não foi *criada* pela observação. Portanto, existia como realidade física.

Essa definição de realidade física carrega uma bagagem filosófica. Mas isso se dá com qualquer outra. No entanto, é uma definição implicitamente aceita pela maioria dos físicos (e provavelmente pela maioria das pessoas).

Agora um pouco de lógica: 1) Assumindo a separabilidade, e dados os resultados da versão de mundo *efetivamente existente* do Experimento I de Alice e Bob, uma realidade tipo EPR é estabelecida. 2) As versões do mundo efetivamente existente dos Experimentos II, III e IV de Alice e Bob estabelecem que a separabilidade *e* a realidade não podem existir *ambas* nesse mesmo mundo. No entanto, segundo 1), se tivermos separabilidade, *devemos* ter realidade, mas segundo 2) não podemos ter ambas. Portanto, *excluímos* separabilidade em nosso mundo efetivamente existente.

Separabilidade

“Separabilidade” tem sido nosso termo simplificado para a possibilidade de separar objetos de modo que o que acontece com um *não* afete de maneira nenhuma o que acontece com o outro. Sem separabilidade, o que acontece em um lugar *pode* afetar instantaneamente o que acontece bem longe, ainda que nenhuma força física esteja conectando os objetos. Bohr aceitava essa estranha predição da teoria quântica como uma “influência”. Mas, para Einstein, um efeito que surgia sem uma força física efetivamente existente era uma “ação fantasmagórica”.

Hoje é geralmente aceito que nosso mundo efetivamente existente não tem separabilidade, embora se admita que isso seja um mistério. Em princípio, quaisquer dois objetos que tenham alguma vez interagido estão para sempre emaranhados e, portanto, o que acontece com um influencia o outro. Experimentos já demonstraram que tais influências se estendem por mais de uma centena de quilômetros. Segundo a teoria quântica, essa conectividade se estende por todo o Universo. Projetistas de computadores quânticos demonstraram essas

influências conectando os elementos lógicos quase macroscópicos de protótipos de computadores quânticos.

A CONECTIVIDADE QUÂNTICA PODE, em princípio, pelo menos, se estender do microscópico para o macroscópico. A ausência de separabilidade de dois objetos quaisquer, por exemplo fótons gêmeos, estabelece uma ausência de separabilidade geral. Considere, por exemplo, a "engenhoca infernal" de Schrödinger, construída de tal maneira que um fóton gêmeo entrando na caixa do gato deflagre uma liberação de cianeto se o fóton exibir uma polarização vertical e não deflagre a liberação de cianeto se exibir uma polarização horizontal. O destino do gato seria determinado pela observação remota da polarização do gêmeo do fóton. É claro que, como a polarização do fóton remoto foi aleatória, assim será o destino do gato. Não há controle remoto.

Falamos em termos de fótons gêmeos porque essa situação é rapidamente descrita e sujeita a teste experimental. E estendemos a ideia ao gato de Schrödinger porque a situação é fácil de descrever, embora essencialmente difícil de demonstrar. Em princípio, porém, quaisquer dois objetos que já tenham interagido estão emaranhados para sempre. O comportamento de um influencia instantaneamente o outro, e o comportamento de tudo emaranhado com ele. Como objetos verdadeiramente macroscópicos são quase impossíveis de isolar, eles se tornam rapidamente emaranhados com todo o resto do seu ambiente. O efeito de tal emaranhamento complexo geralmente se torna indetectável. Mesmo assim, em princípio, há uma conectividade universal cujo significado ainda estamos por entender. Podemos de fato "ver o mundo num grão de areia".

SERÁ QUE O EMARANHAMENTO quântico infinitamente rápido conflita com a relatividade especial, que sustenta que nenhum efeito físico pode viajar mais depressa que a luz? A relatividade especial é básica para grande parte da física, e todos os testes de relatividade concordam com precisão com as previsões da teoria. Não obstante, algumas das premissas subjacentes à relatividade podem

ser desafiadas pela ausência de separabilidade. Um recente artigo na *Scientific American*, por exemplo, intitula-se “Uma ameaça quântica à relatividade especial”. Em todo caso, nenhuma informação, mensagem ou efeito causal pode ser enviado de um observador a outro mais depressa que a velocidade da luz. Bob simplesmente registra uma série aleatória de 1s e 2s. Só quando compara seus dados com os de Alice é que eles podem ver as correlações EPR-Bell.

Ao discutir EPR (ou o Experimento 1) dissemos que Alice olhava primeiro e influenciava o fóton de Bob. Foi-nos perguntado: “E se Alice e Bob olhassem ao mesmo tempo?” Segundo a relatividade especial, para alguns observadores movendo-se em relação a Alice e Bob, pareceria que foi Bob quem olhou primeiro, não Alice. A teoria quântica simplesmente diz que os dois observadores, com seus polarizadores alinhados, verão a *mesma* polarização, e verão correlações nos seus dados em outros ângulos.

Indução e livre-arbítrio

A conectividade quântica nos força a examinar questões que um dia pareceram estar além do reino da física. O teorema de Bell, mais explicitamente que qualquer coisa na física clássica, reside na validade do raciocínio indutivo, e até mesmo do "livre-arbítrio".

O exemplo clássico de raciocínio indutivo é: "Todos os corvos que vimos são pretos; portanto, acreditamos que todos os corvos sejam pretos." Isso *assume* que, se tivéssemos escolhido olhar diferentes conjuntos de corvos, também os teríamos encontrado pretos. Estritamente falando, todo corvo não olhado poderia ser verde. O raciocínio indutivo assume que os corvos que *escolhemos* olhar eram representativos de todos os corvos. Assume que poderíamos *ter escolhido* olhar qualquer outro conjunto de corvos. Indução e livre-arbítrio estão intimamente relacionados.

O raciocínio indutivo, que vai de casos particulares para uma conclusão geral, tem um problema lógico: o único argumento para aceitar sua validade é que ele funcionou (em casos particulares) no passado. Mas esse é o raciocínio indutivo! Há muito se reconhece que o único argumento para a validade de um raciocínio indutivo *assume* o que deve ser estabelecido e, logo, não é logicamente válido. Mesmo assim, toda a ciência se baseia em indução. A partir de exemplos específicos, formulamos regras gerais. Também dirigimos nossa vida e nossas sociedades pelo raciocínio indutivo. (Por exemplo, se não almocei, ficarei faminto. Ou, se ele não tivesse puxado o gatilho, não teria sido mandando para a prisão. Aceitamos tais afirmações como válidas porque funcionaram no passado.)

O RACIOCÍNIO INDUTIVO entrou no nosso experimento dos pares de caixas quando assumimos que o conjunto específico de pares de caixas com o qual *escolhemos*

fazer *ou* um experimento “olhar dentro da caixa” *ou* um experimento de interferência era representativo de *todos* os pares de caixas semelhantes. Assumimos que podíamos escolher demonstrar uma entre duas situações contraditórias. O enigma surgiu porque assumimos que poderíamos *ter escolhido* fazer o experimento diferente daquele que de fato fizemos. Assumimos que tínhamos livre-arbítrio, que nossa escolha não foi predeterminada por aquilo que estava “efetivamente” em cada conjunto de caixas.

Na nossa história de Alice e Bob, e nos experimentos efetivos com fótons gêmeos, a premissa da indução implica que os fótons observados com um ângulo de polarização particular eram representativos de todos os fótons no experimento. Por exemplo, assumimos implicitamente que Alice e Bob (ou Clauser ou Aspect) poderiam ter livremente escolhido fazer o Experimento IV com os fótons com os quais de fato fizeram o Experimento II. E que, se assim tivessem feito, teriam visto a mesma violação da desigualdade de Bell. Assumimos que também não temos um mundo conspiratório, um mundo no qual as escolhas supostamente livres dos experimentadores do teorema de Bell estivessem correlacionadas com fótons específicos.

O PAPEL DO LIVRE-ARBÍTRIO do experimentador geralmente é ignorado por causa de sua aparente obviedade. É, no entanto, uma premissa fundamental, embora improvável, de qualquer investigação científica na qual se busque uma explicação geral para resultados experimentais específicos. (Observamos que sabemos de nosso livre-arbítrio apenas por meio da *experiência consciente* que temos dele como sendo livre.)

Pode-se fugir do enigma quântico negando que seja significativo até mesmo *considerar* experimentos que não foram de fato feitos, e alegar que a percepção consciente de que *poderíamos* tê-los feito não tem sentido. Tal negação do livre-arbítrio vai além da noção de que aquilo que escolhemos fazer é determinado pela eletroquímica do nosso cérebro. A negação requerida implica um mundo *completamente* determinista e conspiratório, um mundo no qual as nossas escolhas supostamente livres são programadas de modo a coincidir com uma

situação física externa. Se isso fosse verdade, não teria sentido falar no que *poderíamos* ter escolhido fazer. Essa postura para fugir do enigma quântico é uma negação da “determinação contrafactual”.

Bell reconheceu que tal possibilidade *lógica* existia, porém mal a considerou como resolução:

> [Mesmo que os ângulos de polarização sejam escolhidos] pelas máquinas da loteria nacional suíça, ou por elaborados programas de computador, ou por físicos com aparente livre-arbítrio, ou por alguma combinação de todos esses fatores, não podemos ter certeza de que [esses ângulos] não sejam significativamente influenciados pelos mesmos fatores que influenciam [os resultados das medições]. Mas essa maneira de arranjar correlações da mecânica quântica confundiria ainda mais a mente do que uma na qual elos causais viajassem mais depressa que a luz. Aparentemente partes separadas do mundo estariam conspiratoriamente emaranhadas, e o nosso provável livre-arbítrio estaria emaranhado com elas.

É por Einstein que o sino dobra?[d]

Tanto Einstein quanto Bohr morreram antes de Bell apresentar seu teorema. Seguramente Bohr teria previsto o resultado experimental confirmando a teoria quântica. Não está claro o que Einstein teria previsto se tivesse visto a prova de Bell. Ele disse que acreditava que as previsões da teoria quântica sempre seriam corretas. Mas como teria se sentido se o resultado previsto fosse uma demonstração fatual daquilo que ele havia ridicularizado como "ações fantasmagóricas"? Será que ainda insistiria que objetos separados não se influenciam mutuamente por conectividades "mais rápidas que a luz"?

Bell, Clauser e Aspect mostraram que Bohr estava certo e Einstein errado no argumento EPR. Mas Einstein estava certo ao dizer que havia algo para ficarmos perturbados. Foi Einstein quem trouxe para o primeiro plano toda a estranheza da teoria quântica. Foram suas objeções que estimularam o trabalho de Bell e que continuam a ressoar nas tentativas atuais de chegar a um termo com a estranha visão de mundo que a mecânica quântica nos impinge.

Segundo Bell:

> Em suas discussões com Bohr, Einstein estava errado em todos os detalhes. Bohr entendia a real manipulação da mecânica quântica muito melhor que Einstein. Mas, ainda assim, em sua filosofia da física e na sua ideia sobre do que se trata e do que estamos fazendo e devemos fazer, Einstein parece ser absolutamente admirável … [N]ão há dúvida de que ele é, para mim, o modelo de como devemos pensar a respeito da física.

---

[c] Em inglês, os autores fazem a distinção entre os termos "*actual*" e "*real*", que muitas vezes são ambos traduzidos para o português como "real". (N.T.)

[d] Intraduzível. "Sino" é Bell, numa óbvia referência ao criador do teorema que, ao ser violado, obriga a aceitação das "ações fantasmagóricas", enterrando portanto as restrições de Einstein. (N.T.)

14. Metafísica experimental

> Todos os homens supõem que aquilo que é chamado de sabedoria lida com as causas primeiras e os princípios das coisas.
>
> ARISTÓTELES, *Metafísica*

Metafísica, literalmente “além da física”, é o título que um editor do século I deu a uma coletânea de obras filosóficas de Aristóteles que vieram depois do seu livro *Física*. Se Aristóteles estivesse vivo atualmente, seguramente exploraria “causas primeiras” tentando entender o que a mecânica quântica nos diz sobre o mundo e sobre nós.

Nosso título para este capítulo, “Metafísica experimental”, foi inspirado numa recente coleção de ensaios com esse nome que discute experimentos de laboratório que exploram os fundamentos da mecânica quântica. O primeiro capítulo do livro (de John Clauser) tem o provocante título “A interferência da onda de De Broglie em pequenas rochas e vírus vivos”, que são os experimentos que Clauser está propondo.

COMO O REINO MICROSCÓPICO dos átomos difere em tantas ordens de grandeza do reino macroscópico dos seres humanos, alguns argumentam que a mecânica quântica tem pouca implicação para nossa visão da natureza em escala humana, “o que realmente está acontecendo”. Essa *não* era a atitude de Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg e outros responsáveis pelo desenvolvimento da teoria quântica. Em anos posteriores, porém, enquanto o enigma quântico permanecia sem solução, e a teoria funcionava tão bem para todos os propósitos práticos, as preocupações iniciais foram fenecendo. Isso mudou. Hoje em dia há grande concordância de que fundamentalmente não entendemos o que está acontecendo.

Pelo menos há grande *dis*cordância acerca do que está acontecendo, que é mais ou menos a mesma coisa.

O teorema de Bell e os experimentos que estimulou são os responsáveis por isso. Eles fizeram mais do que confirmar as estranhas previsões da teoria quântica. Os experimentos mostraram que nenhuma teoria futura poderia *jamais* explicar o nosso mundo efetivamente existente como um mundo “razoável”. Qualquer teoria futura precisa descrever um mundo no qual objetos não têm propriedades que são separadamente suas, independentes da sua “observação”. Em princípio, isso se aplica a *todos* os objetos. Mesmo a nós?

Do ponto de vista da física clássica, alguns argumentam que somos apenas objetos governados pela biologia, pela química e, portanto, em última análise, pela física determinista. No entanto, desde o teorema de Bell, o elemento humano – a livre escolha, por exemplo – é visto como uma das questões fundamentais da física.

Ao mesmo tempo que a livre escolha do experimentador era implícita na física clássica, não há nenhum experimento de física clássica em que a livre escolha, um elemento humano, se torne problemática. Embora jamais possa ser prático fazer um experimento quântico envolvendo a livre escolha, o que sugerimos abaixo chega perto disso.

No restante deste capítulo tocamos em diversos experimentos, propostos e realizados, que conectam de forma cada vez mais próxima, porém misteriosa, o estranho mundo microscópico com o mundo macroscópico “racional” que vivenciamos.

Realizações macroscópicas

Até aqui, ao mencionarmos a existência de objetos em dois lugares ao mesmo tempo ou seu emaranhamento com outro objeto, os objetos eram fótons, elétrons ou átomos, objetos suficientemente pequenos para ser fisicamente isolados de seu ambiente macroscópico. Em anos recentes, fenômenos quânticos têm sido estendidos a objetos maiores e, ainda mais significativamente, a objetos com contato substancial com o ambiente macroscópico. Na época da impressão deste livro seguramente haverá fenômenos impressionantes que teríamos incluído.

EIS AQUI UM DOS primeiros exemplos de "em dois lugares ao mesmo tempo" com um objeto quase macroscópico. Em 1997, pesquisadores do MIT puseram um bloco de *vários milhões* de átomos de sódio em baixa temperatura num estado quântico chamado condensado de Bose-Einstein. Então, eles colocaram esse *bloco único* em dois lugares ao mesmo tempo, separados por uma distância maior do que um fio de cabelo humano. É uma separação pequena, mas é visível macroscopicamente. O *bloco inteiro* estava em ambos os lugares. Cada um de seus átomos estava em ambos os lugares. Para demonstrar que esse bloco, esse objeto quase macroscópico, estava em dois lugares ao mesmo tempo, fizeram o que sempre se faz para demonstrar um estado de superposição. Reuniram o bloco a partir de suas duas regiões de modo a se superpor e produzir um padrão de interferência.

FÍSICOS DA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA em Santa Barbara demonstraram em 2009 um emaranhamento quântico entre dois objetos grandes o bastante para ser vistos a olho nu. A figura 14.1 mostra um chip de circuito eletrônico feito de alumínio em contato com um substrato sólido. Cada lado da caixa maior branca tem seis milímetros. Os pequenos quadrados brancos sobre o fundo cinza são

anéis supercondutores, nos quais pode fluir uma corrente. Um pulso de micro-ondas dirigido ao chip emaranha os dois fluxos de corrente. Classicamente, as correntes dos anéis deveriam ter sentidos completamente independentes um do outro. Mas, depois do emaranhamento pelo pulso de micro-ondas, as correntes fluíram em sentidos opostos, algo explicado apenas pelo emaranhamento quântico desses objetos diretamente visíveis. Emaranhamentos de circuitos desse tipo são a base provável de computadores quânticos.

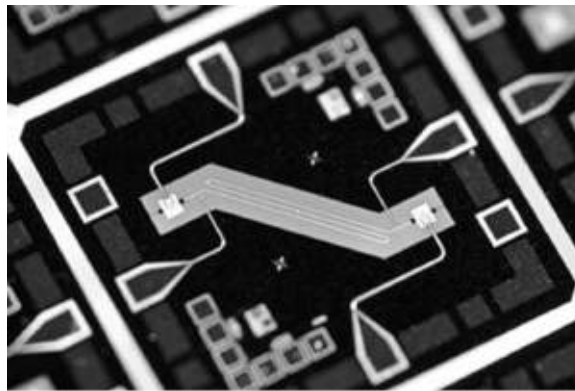



FIGURA 14.1 Os pequenos quadrados brancos sobre fundo cinza são dois objetos macroscópicos emaranhados.

Cientistas do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia dos Estados Unidos exibiram em 2008 o primeiro dispositivo num chip que podia ser razoavelmente descrito como um "computador quântico". Ele até se parece um pouquinho com um circuito de computador dos primeiros tempos. Aqui, íons aprisionados e um circuito associado podem executar pelo menos 160 operações de computador diferentes, embora com apenas 94% de acurácia. Para qualquer uso prático, a precisão teria de ser enormemente melhorada, e um computador quântico prático teria de ligar muitos desses dispositivos por emaranhamento quântico, as "ações fantasmagóricas" de Einstein. Em 2009, a revista *Physics World* escolheu essa façanha quântica como "Grande Avanço do Ano".

UM ARTIGO DE março de 2010 na *Nature News* intitula-se "Scientists supersize quantum mechanics: largest ever object put into quantum state" (Cientistas

superampliam a mecânica quântica: O maior objeto já colocado em estado quântico). O objeto era uma haste de metal achatada com apenas um milésimo de milímetro de comprimento, mas visível a olho nu da mesma maneira que se pode ver um minúsculo grão de poeira num raio de sol. A pequena haste foi resfriada a uma temperatura extremamente baixa até chegar ao estado de maior imobilidade permitido pela mecânica quântica, ficando essencialmente estática. Ela foi então "excitada" para entrar em superposição desse estado imóvel e *simultaneamente* de um estado de vibração. A haste se movia e não se movia ao mesmo tempo. (Reminiscências de um gato que está morto e vivo ao mesmo tempo!) Ainda mais impressionante que a *existência* desse estado de superposição quase macroscópico é o fato de a haste *não estar* fisicamente isolada. Sua base estava solidamente conectada a um bloco de silício, que era o contato físico com o equipamento experimental e, em última análise, com o resto do mundo. Foi suficiente "isolar" o movimento vibratório particular, e desnecessário isolar o objeto físico. Frequentemente se considerava que *qualquer* contato com os arredores macroscópicos faria uma superposição estranha rapidamente colapsar. O emaranhamento dos modos de comportamento de objetos grandes demais para ser isolados agora parece muito mais factível. Essa façanha dos cientistas da Universidade da Califórnia em Santa Barbara foi chamada de "Grande Avanço do Ano" pela revista *Science*. Ainda antes de o ano terminar! Chegou tarde demais para incluirmos uma imagem da haste no livro, mas você pode vê-la em: http://www.nature.com/news/2010/100317/full/news.2010.130.html.

EM 2011, um artigo na revista *Nature* reportou um esforço cooperativo de cientistas de cinco laboratórios diferentes para mostrar interferência com moléculas orgânicas grandes. A maior delas continha 430 átomos. Isso estabeleceu um novo recorde em colocar objetos individuais em dois lugares ao mesmo tempo. Além disso, o fato de moléculas terem temperaturas internas de várias centenas de graus centígrados demonstrou que as funções de onda posicionais não sofrem necessariamente decoerência quando acopladas com

movimentos térmicos internos. Isso torna ainda mais razoável a revelação de fenômenos quânticos em sistemas biológicos. A importância filosófica do seu trabalho não foi ignorada pelos autores, que se referem a suas moléculas como "os gatos de Schrödinger mais gordos realizados até agora".

Propostas macroscópicas

Propostas para o emaranhamento ou a colocação de objetos essencialmente macroscópicos em dois lugares ao mesmo tempo são abundantes. Em alguns casos tem-se em mente uma finalidade adicional, tal como a detecção sensível de ondas gravitacionais. Muitas vezes a motivação é exibir a estranheza da teoria quântica num nível cada vez mais provocativo.

EM 2003, num artigo intitulado "Towards quantum superpositions of a mirror", cientistas da Universidade de Oxford e da Universidade da Califórnia em Santa Barbara alegaram que o resultado implícito no título do artigo, um espelho em estado de superposição quântica, "está ao alcance usando uma combinação de sofisticadas tecnologias de ponta". O espelho do qual estão falando é minúsculo, mas visível a olho nu. Seria montado sobre uma diminuta alavanca com um braço terminando num interferômetro. Uma superposição quântica seria indicada pelo desaparecimento da interferência e seu retorno, à medida que o espelho entra em estado de superposição e então volta ao estado inicial. Os experimentadores, testando em 2006 a possibilidade de concretizar a proposta, concluíram que é factível, embora com dificuldade, usando a tecnologia atual.

EM 2008, cálculos feitos pelos físicos do Instituto Max Planck de Física Gravitacional em Leibniz e Potsdam revelaram que seria possível obter o emaranhamento de dois "espelhos pesadamente macroscópicos" na próxima década. Os espelhos que eles analisam estão nos braços perpendiculares de um interferômetro construído para detectar radiação gravitacional, algo predito pela relatividade geral, mas ainda por observar. Interferômetros de ondas gravitacionais, para os quais são propostos fenômenos quânticos, estão

atualmente em operação e utilizam espelhos que variam de poucos gramas a quarenta quilos.

UM ARTIGO DE 2008 na *Physical Review Focus* da Sociedade Americana de Física, que publica física significativa de interesse amplo, intitula-se "Schrödinger's drum". A alusão obviamente é ao gato de Schrödinger. Aqui o "gato" é uma membrana de nitreto de silício essencialmente macroscópica, com um milímetro quadrado, livre para vibrar como um tambor, e que é resfriada a um estado quântico muito baixo. Pesquisadores de diversas instituições estão discutindo esse tambor. Numa demonstração particularmente interessante, um par dessas membranas seria emaranhado de modo que uma observação de uma influenciasse instantaneamente a outra – sem nenhuma força física a conectá-las.

Fenômenos quânticos em biologia?

O ponto de interrogação no título desta seção reflete nosso preconceito como físicos de que o contato com um ambiente biológico morno e úmido frustraria qualquer superposição ou emaranhamento quântico. Em contraposição a essa preocupação, talvez um único aspecto de um sistema biológico pudesse estar suficientemente desacoplado do resto do corpo. Um exemplo de tal desacoplamento foi demonstrado para a pequena haste visível descrita acima. Essa haste tinha de estar a uma temperatura extremamente baixa, de modo que a vibração dos átomos não perturbasse o estado de superposição, uma exigência habitual para o efeito quântico num objeto de muitos átomos. Baixas temperaturas impediriam qualquer processo biológico. Porém, é concebível que pudesse haver um desacoplamento do movimento térmico. Uma corda de violino aquecida vibrando em muitos milhares de ciclos seria uma analogia clássica. É difícil acreditar num emaranhamento quântico num ambiente morno e úmido, mas será menos contraintuitivo do que o enigma quântico em si?

UM FENÔMENO QUÂNTICO PROPOSTO *com* um organismo biológico, não só *dentro* de um processo biológico, pode levantar questões filosóficas. Em 2009 cientistas do Instituto Max Planck de Garching e do Instituto de Ciências Fotônicas de Barcelona propuseram colocar organismos vivos em estados de superposição quântica em dois lugares ao mesmo tempo. Eles pretendiam fazer levitar opticamente um vírus de influenza, colocá-lo em estado de superposição usando um pulso de luz e subsequentemente detectar o estado de superposição por luz refletida. Sua análise defende a viabilidade de sua proposta até mesmo para organismos vivos maiores, em particular tardígrados, ou "ursos-d'água", que podem sobreviver em baixas temperaturas e no vácuo requerido para tais experimentos. Eles consideram seu trabalho como "um ponto de partida para

abordar experimentalmente questões fundamentais, como o papel da vida e da consciência na mecânica quântica”.

EXPLICAR A EXTRAORDINÁRIA eficiência da fotossíntese pela coerência quântica não é uma ideia nova. Mas, em 2010, químicos na Universidade de Toronto ofereceram evidência experimental de que algas usam a coerência quântica para colher luz. Na fotossíntese, proteínas especiais absorvem fótons para excitar elétrons a uma energia mais alta, de modo a dar início a uma série de transferências de elétrons para “fotossistemas”, onde sua energia dá início à criação de carboidratos. Pela física clássica, os elétrons achariam seu caminho para os fotossistemas por meio de saltos aleatórios. Mas a alta eficiência exibida sugere que as ondas de probabilidade do elétron escolhem vários caminhos simultaneamente e colapsam para encontrar os melhores. Para mostrar isso, os químicos excitaram proteínas com um pulso de laser, usando um segundo pulso para ver aonde iam os elétrons.

ANÁLISES DE PESQUISADORES da Universidade de Genebra e da Universidade de Bristol mostraram em 2009 que experimentos quânticos estabelecendo uma violação da desigualdade de Bell são possíveis com olhos humanos como detectores num local. Como o olho humano não pode detectar confiavelmente um fóton isolado, um dos dois fótons gêmeos é amplificado, clonando-o por emissão estimulada. O que se alega aqui não é somente que pode haver emaranhamento entre dois sistemas microscópicos, mas também que pode haver emaranhamento entre um objeto microscópico e um sistema humano macroscópico. Isso supostamente pode ser assim, mesmo na presença de perda de fótons para o ambiente, o que seria de se esperar que desmanchasse o emaranhamento.

UM ARTIGO DE 2009 nos *Proceedings of the National Academy of Science* intitula-se “Some quantum weirdness in physiology”. O artigo observa que “a maioria

dos cientistas biomoleculares modernos encara a mecânica quântica muito como os adeptos veem seu Deus; ela meramente monta o cenário para a ação e então imagens amplamente deterministas, classicamente compreensíveis, assumem o comando". O artigo comenta uma dúzia de estudos, a maioria recentes, que *negam* esse paradigma. Esses artigos reportam evidências de efeitos de coerência quântica, ou seja, superposições e emaranhamentos, em sistemas biológicos, principalmente fotossíntese e visão.

DUAS OUTRAS PROPOSTAS para fenômenos quânticos ainda mais estranhos num sistema biológico, a saber, o cérebro humano, uma de Roger Penrose e outra de Henry Stapp, são tratadas no capítulo 17. Ambas enfocam a questão da consciência.

Além da sabedoria convencional

Dois objetos quaisquer que interajam tornam-se emaranhados. Depois disso, o que quer que aconteça com um deles influencia instantaneamente o outro, não importa quão distantes estejam um do outro. Isso tem sido exaustivamente demonstrado com pares de partículas microscópicas, e até mesmo com dispositivos quase macroscópicos. Como objetos emaranhados se emaranham ainda com outros objetos, o emaranhamento torna-se complexo. Após a interação com um objeto macroscópico, qualquer emaranhamento se dissolve, para todos os propósitos práticos. Num certo sentido, porém, como *tudo* interagiu pelo menos de forma indireta, existe, em princípio, uma conectividade universal. Tem sido alegado que você está emaranhado em termos de mecânica quântica com qualquer pessoa com quem já se encontrou, presumivelmente mais emaranhado em casos de encontros mais intensos. Isso é, obviamente, uma extensão muito além de qualquer coisa demonstrável, portanto além de qualquer coisa significativa. O emaranhamento complexo se torna essencialmente emaranhamento *nenhum*.

No entanto, estudos recentes sugerem que o emaranhamento persiste por mais tempo que implicam os cálculos convencionais. Como exemplo, na molécula magneticamente sensível que as aves possivelmente usam como bússola, os elétrons permanecem emaranhados de dez a cem vezes mais tempo que o esperado. Formulações atuais podem ser pessimistas demais quanto à sobrevivência de efeitos quânticos. A história fracassada dos limites teóricos dos efeitos quânticos sugere manter a mente aberta.

Por exemplo, o teórico de informação quântica Seth Lloyd descobriu em 2008 “benefícios quânticos” que sobrevivem mesmo *depois* da decoerência do emaranhamento. Alega-se que esse efeito inesperado pode tornar possível enxergar mais acuradamente um objeto iluminando-o com fótons gêmeos. Seria possível armazenar um fóton de cada par, compará-lo com seu gêmeo refletido e

rejeitar quaisquer fótons extraviados, que não teriam gêmeos armazenados. Isso poderia funcionar mesmo que o emaranhamento dos fótons que retornassem com seus gêmeos sofresse decoerência como resultado de sua interação com o objeto do qual foram refletidos. Lloyd descobriu, para sua surpresa, que, "para obter aproveitamento pleno da iluminação quântica, todo emaranhamento precisa ser destruído". Outros físicos ficaram céticos, até que verificaram e confirmaram os cálculos de Lloyd.

QUANDO UM OBJETO em estado de superposição sem *nenhuma* posição particular encontra um objeto macroscópico, sua função de onda de superposição colapsa para uma posição *particular*. De maneira similar, quando um fóton encontra um polarizador vertical seguido de um contador Geiger, o acionamento ou não acionamento do contador indica se o fóton estava vertical ou horizontal. Essa é a interpretação de Copenhague, e certamente é verdadeira, para todos os propósitos práticos.

Como sabemos se é *efetivamente* verdadeira? Como podemos ter *certeza* de que o contador Geiger não entra em estado de superposição, sendo simultaneamente acionado e não acionado antes de ser observado por um ser humano? É uma pergunta boba. Mas que não tem uma resposta *experimentalmente* estabelecida.

Eis uma pergunta relacionada: como podemos ter certeza *absoluta* de que, numa versão efetivamente existente do nosso experimento do teorema do Bell, a escolha supostamente livre de Alice do seu ângulo de polarização é verdadeiramente independente da escolha supostamente livre de Bob do seu próprio ângulo de polarização? O teorema de Bell e os experimentos que estabelecem uma violação da desigualdade de Bell dependem crucialmente dessa premissa.

Nos experimentos de laboratório efetivamente realizados, apenas alguns metros podem separar Alice e Bob. Para ter certeza absoluta de que não foi fisicamente possível que uma escolha do ângulo de polarização no local de Alice

afetasse a escolha no local de Bob, as duas escolhas teriam de ser feitas num tempo menor do que aquele que a luz levaria para percorrer os vários metros de Alice a Bob. Teriam de ser feitas em menos de uma fração de microssegundo.

Seres humanos não conseguem fazer escolhas tão depressa. Nos experimentos efetivamente realizados, dispositivos eletrônicos rápidos faziam as escolhas de “Alice” e “Bob”. Podemos ter certeza absoluta de que as escolhas feitas por caixas com eletrônicos são verdadeiramente independentes? Não se pode descartar completamente que *alguma coisa* na história passada desses dispositivos tenha correlacionado as duas decisões. É extremamente improvável, difícil de acreditar. Mas a interpretação que esses experimentos exigem também é difícil de acreditar.

As escolhas que temos mais certeza de que foram feitas independentemente são as nossas próprias livres escolhas conscientes. E concedemos esse livre-arbítrio a nossos colegas humanos, Alice e Bob. Idealmente, portanto, desejaríamos que o experimento Bell-EPR fosse feito com seres humanos, em vez de dispositivos eletrônicos, escolhendo os ângulos de polarização. No entanto, precisamos ter certeza *absoluta* de que, durante o segundo ou algo assim que Alice leva para fazer a escolha, ela não comunique de maneira nenhuma sua escolha a Bob. Num experimento ideal, desejaríamos estabelecer que aquilo que Alice escolhe observar não poderia afetar de modo algum aquilo que Bob escolhe observar.

Para excluir qualquer possível comunicação entre observadores humanos como detectores de fótons, Anthony Leggett (prêmio Nobel de Física, 2003) sugeriu que os observadores fossem separados pela distância que a luz (ou qualquer interação física) percorre em um segundo. São aproximadamente 300 mil quilômetros. É uma distância longa, mas menos que os quase 400 mil quilômetros até a Lua. Podemos separar seres humanos no espaço por uma distância dessas e fazer um experimento do teorema de Bell entre eles. “Algum dia isso acontecerá. Não há dúvida na minha mente”, diz Anton Zeilinger, em cujo laboratório moléculas de buckminsterfulereno (*buckyballs*) foram colocadas em dois lugares ao mesmo tempo.

NÃO NOS SENTIMOS à vontade com “influências” não físicas. Ou com a criação da realidade pela “observação”. Certamente não com a criação da *história*. A metafísica experimental poderá algum dia levar a explicações além da teoria quântica de hoje. Mas Zeilinger adverte: “Essa nova teoria será tão mais estranha … as pessoas que atacam a mecânica quântica agora ansiarão por tê-la de volta.” Lá atrás citamos John Bell dizendo que provavelmente ficaríamos “estarrecidos”.

15. O que está acontecendo?
Interpretando o enigma quântico

Você sabe que algo está acontecendo aqui, mas não sabe o que é.

BOB DYLAN

É um fato impressionante que quase todas as interpretações da mecânica quântica … dependem em algum grau da presença da consciência para prover o “observador” que é necessário para … o surgimento de um mundo do tipo clássico.

ROGER PENROSE

Físicos e consciência

Atualmente a maioria dos físicos está disposta a enfrentar o enigma quântico, e alguns lutam para *interpretar* o que a mecânica quântica poderia estar nos dizendo. Várias interpretações de hoje competem com a posição de Copenhague. Antes de falar delas, vamos refletir sobre como diferentes físicos abordam o enigma.

Até o dia em que morreram, Bohr e Einstein discordaram a respeito da teoria quântica. Para Bohr, a teoria com sua interpretação de Copenhague era a base adequada para a física. Einstein rejeitava o conceito de Copenhague de uma realidade física criada pela "observação". Mesmo assim, aceitava uma *meta* da interpretação de Copenhague, que era permitir que a física seguisse adiante sem lidar com a consciência. A maioria dos físicos (inclusive nós mesmos) concordaria que a consciência *em si* está além da disciplina da física e não é algo a ser estudado num departamento de física.

Não é que os físicos tenham aversão a um escopo amplo. Por exemplo, um famoso tratamento matemático da relação predador-presa (raposas e coelhos isolados numa ilha) foi publicado na *Review of Modern Physics*. Em Wall Street, físicos modelam arbitragem (e são chamados "*quants*"). Até mesmo um de nós (Bruce) já se aventurou pela biologia para analisar como os animais detectam o campo magnético da Terra. Tais coisas são aceitas alegremente como parte da disciplina da física, enquanto o estudo da consciência não é. Aqui está uma definição operacional da física que torna tal atitude compreensível: a física é o estudo dos fenômenos naturais que podem ser tratados com sucesso com modelos bem especificados e testáveis.

Por exemplo, a física trata de átomos e moléculas *simples*. A química, por outro lado, lida com *todas* as moléculas, a maioria das quais têm distribuições de elétrons complexas demais para ser bem especificadas. Um físico pode estudar

um sistema biológico caracterizado com facilidade, mas o funcionamento de um organismo complexo reside no domínio dos biólogos.

Qualquer coisa que revele não ser tratável com sucesso com um modelo bem especificado e testável é *definida* com relativa rapidez como algo fora da física. Quando focalizarmos a consciência no capítulo 16, não ofereceremos tal modelo – ninguém jamais apresentou um modelo desses. Até que um seja desenvolvido, a consciência não se qualificará para estudo pela física.

Esse é um motivo suficiente para não estudar consciência nos departamentos de física, mas dificilmente explica a emoção que falar do *encontro* de nossa disciplina com a consciência pode despertar. Recentemente eu (Fred) dei uma palestra em nosso departamento de física relatando uma conferência da qual participei na Universidade de Princeton homenageando o cosmólogo quântico John Wheeler em seu nonagésimo aniversário. Várias apresentações sobre cosmologia e os fundamentos da mecânica quântica referiram-se à consciência. Quando fiz um relato em nosso departamento acerca dessa conferência e dos nossos interesses relacionados, fui questionado por dois membros mais velhos do corpo docente: "Vocês estão levando a física de volta para a Idade das Trevas!" E: "Use seu tempo para fazer boa física, não essa bobagem!" Por outro lado, os pós-graduandos de física que estavam na plateia pareciam fascinados.

A FÍSICA CLÁSSICA, com sua imagem mecânica do mundo, tem sido usada para negar a existência de qualquer coisa além do que é estritamente mecanicista. *A física quântica nega essa negativa.* Ela insinua algo além do que habitualmente consideramos física, além do que *habitualmente* consideramos o "mundo físico". *Mas esse é o máximo a que se chega!* Devemos ser cuidadosos. Ao lidar com os mistérios da mecânica quântica, estamos caminhando na beira de uma ladeira escorregadia.

Um filme recente, cujo estranho título original é *What's the #$*! Do We (K)now!?* (informalmente chamado *What the Bleep?*),[e] foi descrito pela revista *Time* como "um estranho híbrido de documentário científico e revelação

espiritual, com a participação de um coro grego de Ph.Ds. e discursos místicos sobre física quântica”. O filme usa efeitos especiais para mostrar fenômenos quânticos com objetos macroscópicos. Por exemplo, exagera muito a incerteza quântica da posição de uma bola de basquete. Isso é fácil de entender como uma hipérbole pedagógica. A alusão do filme ao encontro da mecânica quântica com o reino da consciência também é válida. Mas aí o filme se aventura em “revelações quânticas” que levam uma mulher a jogar fora sua medicação antidepressiva até uma “canalização quântica” de um deus da Atlântida de 35 mil anos e outras tolices ainda maiores.

O que fica na cabeça de algumas pessoas que saem do cinema? Se é a impressão de que os físicos passam seu tempo lidando com as “revelações espirituais” que o filme descreve, então ficamos constrangidos. Se os espectadores pensam que os físicos do filme que expressam tais ideias místicas representam mais do que uma minúscula fração de sua comunidade, então foram enganados. O filme escorrega feio ladeira abaixo.

Nosso antídoto para tratamentos sensacionalistas e enganosos das implicações da mecânica quântica seria que a disciplina da física se abrisse mais para a discussão do enigma quântico, particularmente em cursos de física conceitual. Manter nosso esqueleto no armário deixa o campo livre para os vendedores de pseudociência.

Por que interpretações?

Se um amigo seu de confiança lhe contasse algo que parecesse ridículo, você tentaria *interpretar* o que ele poderia estar realmente querendo dizer. Demonstrações físicas dignas de confiança nos contam algo que parece ridículo. Portanto, tentamos *interpretar* o que esses resultados podem realmente querer dizer. Mesmo havendo um consenso acerca dos resultados experimentais, não há consenso sobre seu significado. Muitas interpretações competem atualmente. Cada uma delas exibe uma estranheza quântica. A interpretação de Copenhague fornece aos físicos uma maneira de ignorar a estranheza, ao menos para todos os propósitos *práticos*, e seguir adiante com o negócio da física. Convenientemente, a maioria dos físicos aceita isso. Mas também vale a pena explorar o que a natureza está nos dizendo.

Como diz John Bell (só um pouquinho de brincadeira):

> Não é bom saber o que vem depois do quê, mesmo que não necessariamente Fapp [*for all practical purposes* – para todos os propósitos práticos]? Suponha, por exemplo, que se descobrisse que a mecânica quântica *resiste* a uma formulação precisa. Suponha que, ao tentar uma formulação além de Fapp, encontrássemos um dedo imovível apontando obstinadamente para fora do tema, para a mente do observador, para as escrituras hindus, para Deus ou mesmo apenas para a Gravitação? Isso não seria muito, muito interessante?

Ir além de Fapp para interpretar a teoria quântica é hoje uma indústria em crescimento, e um campo contencioso, embora uma fração muito pequena de todos os físicos esteja envolvida. Cada uma das interpretações correntemente propostas olha numa direção diferente para aquilo que a mecânica quântica revela sobre nosso mundo. Às vezes, interpretações diferentes parecem dizer a mesma coisa em termos diversos. Ou duas interpretações podem até mesmo contradizer-se mutuamente. Tudo bem. Se as *teorias* científicas precisam ser testáveis, as *interpretações* não precisam. Todas as “interpretações” assumem os mesmos fatos experimentais.

A maioria das interpretações aceita tacitamente que a mecânica quântica em última análise *encontra* o problema da observação consciente. No entanto, elas geralmente começam com a *premissa* de que os físicos devem lidar com um mundo físico independente do observador humano.

Murray Gell-Mann, por exemplo, começa uma abordagem popular da física quântica dizendo: “[O] Universo presumivelmente não poderia se importar menos com o fato de os seres humanos terem evoluído em algum obscuro planeta para estudar sua história; ele continua obedecendo às leis físicas da mecânica quântica independentemente da observação por parte dos físicos.” Ao falar sobre a física *clássica*, a premissa explícita de Gell-Mann de que as leis da física são independentes do observador humano funcionaria *sem* ele precisar dizer.

Cada interpretação apresenta uma visão de mundo esquisita. E como poderia ser de outro modo? Vimos a esquisitice da mecânica quântica de frente em fatos experimentais neutros quanto à teoria. Qualquer interpretação desses fatos que vá além do “Cale a boca e calcule!” *tem que ser* esquisita.

Embora as interpretações que discutiremos tenham sido desenvolvidas com extensiva análise matemática e lógica, apresentamos cada uma em alguns poucos parágrafos não técnicos. Tratamos de forma um pouco mais detalhada as três principais alternativas de hoje a Copenhague (decoerência, muitos mundos e Bohm). A compreensão substancial de qualquer uma delas *não* é crucial para o que se segue. Só queremos mostrar diferentes perspectivas sobre as possíveis implicações dos dados dos experimentos quânticos. Considere como cada interpretação faz com que a física inevitavelmente encontre a consciência, mas também como cada uma evita requerer qualquer relação séria da física com a consciência. (Pedimos desculpas a qualquer pessoa cuja interpretação favorita tenha sido deixada de fora.)

Dez interpretações que atualmente competem entre si

Copenhague

A interpretação de Copenhague, uma postura ortodoxa da física, é a maneira como os físicos – inclusive nós mesmos – ensinam e usam a teoria quântica. Falamos pouco sobre ela aqui pois anteriormente já dedicamos a ela todo o capítulo 10. Na versão padrão de Copenhague, a observação cria a realidade física do mundo microscópico, mas o "observador" pode, para todos os propósitos *práticos*, ser considerado como um dispositivo macroscópico de medição, um contador Geiger, por exemplo.

Copenhague aborda o enigma quântico dizendo-nos para usar pragmaticamente a física quântica para o microcosmo e a física clássica para o macrocosmo. Como supostamente nunca vemos o microcosmo "diretamente", podemos simplesmente ignorar sua estranheza e portanto desconsiderar o encontro da física com a consciência. No entanto, à medida que a estranheza quântica vai sendo vista com objetos cada vez maiores, fica mais difícil não tomar conhecimento dela, e outras interpretações proliferam.

Copenhague extrema

Aage Bohr (filho de Niels Bohr e também laureado com o Nobel de Física) e Ole Ulfbeck sustentam que a interpretação de Copenhague não vai longe o suficiente. A interpretação de Copenhague padrão permite que a física ignore seu encontro com a consciência confinando a realidade criada pelo observador ao mundo microscópico. Bohr e Ulfbeck negam explicitamente a *existência* do microcosmo. Na visão deles, não existem átomos.

Bohr e Ulfbeck pretendem que sua visão tenha aplicação geral, mas a discutem em termos dos cliques de um contador Geiger e das correspondentes mudanças num pedaço de urânio. Normalmente consideramos que núcleos de urânio emitem aleatoriamente partículas alfa (núcleos de hélio), tornando-se assim núcleos de tório. Na interpretação de Copenhague, a função de onda espalhada da partícula alfa é, para todos os propósitos práticos, colapsada pelo contador Geiger para a posição na qual o contador a observou.

Bohr e Ulfbeck julgam inaceitável tal resolução "para todos os propósitos práticos". Pegando o touro pelos chifres, alegam que objetos de escala atômica absolutamente não existem. Nada se moveu através do espaço entre o pedaço de urânio alterado e o clique do contador Geiger. Os cliques vivenciados conscientemente em contadores são eventos "genuinamente fortuitos" que estão correlacionados com as mudanças num pedaço remoto de urânio sem as partículas alfa intermediárias.

Nas palavras deles:

> A noção de partículas como objetos no espaço, extraída da física clássica, é dessa maneira eliminada. … O clique, sendo genuinamente fortuito, não é mais produzido por uma partícula que penetra no contador, como tem sido a precipitada conclusão em mecânica quântica. … A trajetória descendente a partir de eventos macroscópicos no espaço-tempo, que em mecânica quântica padrão continua na região das partículas, não se estende além da investida de cliques.

Consequentemente, quando químicos, biólogos e engenheiros falam de fótons, elétrons, átomos e moléculas, estão meramente lidando com modelos que não têm realidade física. Não há fótons passando através do espaço entre a lâmpada e o seu olho. Não há moléculas de ar batendo na vela para empurrar o veleiro pela água.

Decoerência e histórias decoerentes

Alguns anos atrás, um físico usaria a palavra "colapso" para descrever o processo de observação pelo qual uma função de onda em estado de superposição se torna uma realidade única observada. Em vez de "colapso", um físico de hoje poderia usar a palavra "decoerência". Ela se refere ao processo, agora bem estudado, pelo qual a função de onda de um objeto microscópico interage com o ambiente macroscópico para produzir o resultado que efetivamente observamos, que a interpretação de Copenhague descreve como o inexplicado "colapso" da função de onda. A decoerência pode ser considerada uma extensão de Copenhague.

Tomemos nosso exemplo do par de caixas. Considere um átomo cuja função de onda esteja simultaneamente nas duas caixas. Agora enviamos um fóton através de janelas transparentes em uma das caixas. Se o átomo estivesse nessa caixa, o fóton ricochetearia nele e assumiria uma nova direção. Se o átomo estivesse na outra caixa, o fóton passaria direto sem mudar de direção. Como o átomo está na verdade simultaneamente nas duas caixas, o fóton faz *ambas* as coisas. A função de onda do átomo torna-se emaranhada com a do fóton. Cada fóton perturba *aleatoriamente* a relação de fase entre as partes de cada função de onda do átomo nas duas caixas. As partes da função de onda de cada par de caixas então se cancelam em diferentes lugares na tela de detecção. Logo, não se forma nenhum padrão.

Assim, átomos cuja função de onda se emaranhou com as dos fótons não podem participar de um padrão de interferência. A fase daqueles átomos ficaria misturada, sofreria "decoerência". Os átomos estariam em distribuição

essencialmente uniforme. Sem um padrão de interferência, não haveria evidência de átomos estarem simultaneamente em ambas as caixas.

Na verdade, se os fótons em questão não interagem com outros objetos, um astucioso experimento de interferência com o conjunto de pares de caixas *e* com os fótons poderia demonstrar que cada átomo de fato estava simultaneamente em *ambas* as caixas e que cada fóton *tanto* ricocheteou no átomo *quanto* passou através de uma caixa vazia.

Suponha, porém, que os fótons passem através das nossas caixas e então encontrem o ambiente macroscópico. Assumindo aleatoriedade térmica, é possível calcular o tempo fantasticamente curto após o qual um experimento de interferência se torna impossível, para todos os propósitos práticos. Depois disso, não se pode exibir um enigma quântico. Uma média das funções de onda com decoerência dos átomos nos deixa com uma equação para uma probabilidade do tipo clássico para cada átomo existir inteiramente em uma ou em outra caixa do par. Em testes experimentais a taxa de decoerência para objetos massivos como moléculas grandes confirma acuradamente os cálculos da teoria da decoerência.

Como nenhum observador, consciente ou não, precisa ser mencionado, alguns argumentam que isso resolve o problema do observador. Outros veem um *non sequitur* fundamental nesse argumento. Essas probabilidades do *tipo* clássico ainda são probabilidades daquilo que será *observado*. *Não* são verdadeiras probabilidades clássicas do que de fato *existe*. A decoerência é então meramente uma solução Fapp para o enigma quântico. W.H. Zurek, um importante responsável pelo desenvolvimento da interpretação de decoerência, reconhece que a consciência é encontrada pelo menos *em última instância*:

> Uma resposta exaustiva a essa pergunta [a percepção de uma realidade exclusiva] indubitavelmente precisaria envolver um modelo de "consciência", uma vez que aquilo que estamos realmente perguntando diz respeito à nossa (do observador) impressão de que "somos conscientes" de apenas uma das alternativas.

Uma extensão do conceito de decoerência, as "histórias decoerentes" aplicam audaciosamente a teoria quântica ao Universo inteiro, do começo ao

fim. Não havia observadores no Universo inicial e nunca existiram observadores *externos* em momento algum; o Universo inclui tudo. Como não se pode lidar com a complexidade infinita do Universo, são tratados apenas certos aspectos e médias do restante.

Para uma ideia muito grosseira de como isso pode funcionar, considere um átomo a caminho do seu par de caixas passando através de um gás ralo de átomos muito mais leves. Com ricochetes suaves, nosso átomo não é desviado intensamente de suas duas trajetórias, mas as partes da função de onda de cada trajeto, mudando de fase um pouquinho a cada ricochete, sofrem decoerência suficiente para que não seja possível nenhum experimento de interferência, para todos os propósitos práticos. Fazendo a média de um grande número de histórias possíveis, uma para cada série possível de ricochetes, chegamos a duas histórias granuladas, uma para cada átomo em cada caixa. Agora alegamos que apenas uma dessas duas histórias é real e a outra é simplesmente aquela que teria sido possível.

Em seu desenvolvimento dessa interpretação, Gell-Mann e James Hartle discutem a evolução de um Igus (*information gathering and utilizing system* – sistema de coleta e utilização de informação). Presume-se que o Igus possa eventualmente tornar-se um observador que tem ao menos a ilusão consciente do livre-arbítrio.

Muitos mundos

A interpretação dos muitos mundos aceita *literalmente* o que a teoria quântica diz. Onde a interpretação de Copenhague sustenta que a observação faz misteriosamente colapsar a função de onda do átomo numa única caixa – e o gato de Schrödinger num estado vivo *ou* morto –, a interpretação dos muitos mundos simplesmente diz “não” ao colapso. Se a teoria quântica diz que o gato está simultaneamente vivo e morto, então que seja! Em um mundo, o gato de Schrödinger está vivo e em outro está morto.

Hugh Everett lançou a ideia dos muitos mundos na década de 1950 para permitir aos cosmólogos lidar com uma função de onda para o Universo inteiro. Sem necessidade de "observadores" para colapsar a função de onda, a interpretação dos muitos mundos presume resolver o enigma quântico pelo artifício aparentemente sensato de incluir a consciência como parte do Universo físico descrito pela mecânica quântica.

Na interpretação dos muitos mundos você é parte da função de onda universal. Considere nossos pares de caixas. Quando olha numa das caixas, você se emaranha com o estado de superposição do átomo. Você entra num estado de superposição por *simultaneamente* ver o átomo na caixa que olhou e ver essa caixa vazia. Agora há dois de você, um em cada um de dois mundos paralelos. A consciência de um "você" não está ciente do outro "você". Em vez de olhar numa caixa, um terceiro "você" fez um experimento de interferência. Nada do que efetivamente vivenciamos entra em conflito com essa bizarra visão.

Para trazer à cena mais que um observador, voltemos ao gato de Schrödinger. Alice olha na caixa enquanto Bob está distante. O mundo se divide em dois. Em um mundo Alice, vamos chamá-la de $Alice_1$, vê um gato vivo. No outro, $Alice_2$ vê um gato morto. A essa altura Bob também está em ambos os mundos, mas Bob_1 e Bob_2 são essencialmente idênticos. Caso Bob_1 se encontrasse com $Alice_1$, ele a ajudaria a pegar leite para o gato faminto. Bob_2 ajudaria $Alice_2$ a enterrar o gato morto. Os objetos macroscópicos $Alice_2$ e Bob_1 existem em mundos diferentes e, para todos os propósitos práticos, nunca se encontram.

Após o teorema de Bell e os experimentos que permitiu, sabemos que nosso mundo de fato existente talvez não possa ter realidade e, com certeza, não pode ter separabilidade. Na interpretação dos muitos mundos, não há separabilidade. No mundo em que Alice encontra o gato vivo, Bob se torna instantaneamente uma pessoa no mundo "gato vivo". E claramente não há uma realidade *única*, o que parece equivalente a nenhuma realidade.

A interpretação dos muitos mundos desperta fortes emoções. Um autor acadêmico a desacredita como "libertina" e refere-se a seu proponente como "analista de pesquisa de armas, multimilionário dono de um Cadillac com chifres

e fumante inveterado”. (Na época em que Everett fez a proposta, não passava de um estudante de pós-graduação.) Por outro lado, um grande nome da computação quântica escreve que a interpretação dos muitos mundos “sob muitos aspectos faz mais sentido que qualquer outra visão de mundo anterior, e certamente mais que o pragmatismo cínico que nos dias de hoje, com demasiada frequência, serve como substituto para uma visão de mundo entre os cientistas”. (Por “pragmatismo cínico” ele seguramente se refere à aceitação não questionada de Copenhague.)

A interpretação dos muitos mundos é atualmente a favorita de muitos cosmólogos quânticos para o Universo primordial que consideram. Eles podem ignorar o problema do observador. Nada de observadores naquele período. Como o Universo inclui tudo, está por definição isolado de qualquer “ambiente” externo. A decoerência portanto não precisa ser um problema. Um colega cosmólogo quântico nos diz que a interpretação dos muitos mundos é a sua favorita, embora não goste dela.

Há um problema não resolvido na interpretação dos muitos mundos: o que constitui uma observação? *Quando* é que o mundo se divide? A divisão em dois mundos é presumivelmente apenas uma maneira de falar. Será que infinitos mundos são continuamente criados?

Em todo caso, a interpretação dos muitos mundos estende vastamente o que Copérnico começou. Não só somos removidos do centro do cosmo para ocupar um pontinho minúsculo num Universo ilimitado, como o mundo que vivenciamos é apenas uma fração mínima de todos os mundos. No entanto, “nós” existimos em muitos deles. Muitos mundos, a descrição mais bizarra da realidade já proposta seriamente, fornece uma base fascinante para a especulação e para a ficção científica.

Transacional

A interpretação transacional aborda os desafios intuitivos apresentados pelos gatos de Schrödinger e a conectividade universal, permitindo que a função de

onda evolua para trás bem como para a frente no tempo. O futuro portanto afeta o passado. Isso, obviamente, altera a maneira como olhamos o que está acontecendo.

Eis um exemplo oferecido pelo proponente da interpretação transacional, John Cramer:

> Quando estamos parados no escuro e olhamos uma estrela a cem anos-luz de distância, não só as ondas de luz retardadas vindas da estrela viajaram cem anos para alcançar nossos olhos, como as ondas adiantadas geradas por processos de absorção dentro dos nossos olhos alcançaram cem anos no passado, completando a transação que permitiu à estrela brilhar em nossa direção.

Embora essa abordagem "para trás no tempo" ainda encontre o observador consciente, acabamos tendo o enigma quântico embalado no que parece ser um único mistério.

Bohm

Em 1952 um jovem e ousado físico, David Bohm, fez o "impossível": produziu um *contraexemplo* do longamente aceito teorema que alegava mostrar que os fatos experimentais eram inconsistentes com variáveis ocultas. O contraexemplo de Bohm reproduzia todas as previsões da teoria quântica com uma interpretação que tinha variáveis ocultas, grandezas que não aparecem na formulação padrão da teoria quântica. Suas "variáveis ocultas" eram as posições efetivas das partículas. Foi o trabalho de Bohm que inspirou John Bell a encontrar o furo matemático na prova de "nada de variáveis ocultas" e a acabar criando o teorema de Bell.

Bohm também era ousado politicamente. Depois de recusar-se a testemunhar perante o Comitê de Atividades Antiamericanas na Câmara, a Universidade de Princeton o demitiu, e ele não conseguiu outro emprego acadêmico nos Estados Unidos.

Bohm começa sua interpretação assumindo que suas partículas, em média, inicialmente têm a distribuição exigida pela equação de Schrödinger. Então, com uma matemática objetiva e direta, deduz uma "força quântica" que atua sobre

suas partículas para levá-las a continuar obedecendo à equação de Schrödinger. A força quântica é geralmente mencionada em termos de “potencial quântico”.

O potencial quântico guia em vez de empurrar. Bohm oferece a analogia de uma radiobaliza dirigindo um navio. A conectividade universal intrínseca à teoria quântica aparece bem no início dessa interpretação. O potencial quântico que um objeto experimenta depende das posições instantâneas de todos os outros com que aquele em questão já interagiu, e de todos os objetos com que alguma vez *esses objetos* já interagiram. Em princípio, isso inclui interação com tudo no Universo. O potencial quântico de Bohm fornece as “influências” de Bohr, o que Einstein chamou de “ações fantasmagóricas”.

A interpretação de Bohm descreve um mundo fisicamente real, completamente determinista. O potencial quântico instantâneo universal exige um mundo “supradeterminista”. A aleatoriedade quântica só aparece porque não podemos saber a posição inicial e a velocidade precisas de cada partícula. Não há colapso inexplicado da função de onda, como o que ocorre na interpretação de Copenhague; não há divisão inexplicada da consciência como a da interpretação dos muitos mundos. Alguns alegam que a interpretação de Bohm resolve o problema do observador na mecânica quântica, ou pelo menos o transforma num problema benigno, tal como é na física newtoniana.

Outros, inclusive Bohm, enxergam de maneira diferente. Ao contrário do átomo newtoniano, que meramente entra numa única caixa do par, o átomo bohmiano que entra numa caixa única também “sabe” a posição da outra caixa. Por meio do potencial quântico, o par de caixas macroscópico esteve sempre em comunicação instantânea com o resto do mundo, e portanto com o dispositivo macroscópico que anteriormente liberou o átomo, e portanto com o átomo incidente. O potencial quântico conecta tudo isso desde o começo e assim determina até mesmo onde o átomo pousaria em qualquer padrão de interferência posterior. O ser humano que fez o arranjo do experimento, presumivelmente também um objeto físico, também influencia o potencial quântico. (E é influenciado por ele?)

Como na interpretação dos muitos mundos, não havendo colapso, a parte da função de onda correspondente àquilo que não foi observado continua para sempre. Podemos encontrar o gato de Schrödinger vivo, mas a parte da função de onda que contém a possibilidade do gato morto, e seu dono o enterrando, continua existindo. Podemos ignorar essa parte da função de onda para todos os propósitos práticos, já que ela se emaranhou com o ambiente. Mas nessa interpretação ela é real e, em princípio, tem consequências futuras.

Bohm aceitava o encontro da física com a consciência. Em seu livro altamente técnico sobre teoria quântica, *The Undivided Universe*, cujo título enfatiza que a teoria quântica se aplica ao macroscópico bem como ao microscópico, Bohm e Basil Hiley escrevem:

> Ao longo deste livro nossa posição tem sido de que a teoria quântica em si pode ser entendida sem introduzir a consciência e de que, no que concerne à pesquisa física, pelo menos no presente período geral, essa é provavelmente a melhor abordagem. No entanto, a intuição de que a consciência e a teoria quântica estejam em algum sentido relacionadas parece ser boa.

Naquela noite em que Einstein tentou falar a mim (Bruce) e a um colega de pós-graduação em física sobre seus problemas com a mecânica quântica, ele também comentou: "David [Bohm] fez uma coisa boa, mas não foi o que eu disse a ele." Jamais tendo sido expostos a esses problemas em nossos estudos de mecânica quântica, não sabíamos do que Einstein estava falando. Eu gostaria de ter sido capaz de lhe perguntar o que havia dito a Bohm.

Ithaca

David Mermin, da Universidade Cornell em Ithaca, Nova York, propondo o que chama de "interpretação de Ithaca", identifica dois "quebra-cabeças básicos": a probabilidade objetiva, que surge apenas na teoria quântica, e o fenômeno da consciência.

A probabilidade clássica é subjetiva, uma medida da ignorância do indivíduo. A probabilidade *quântica* é objetiva, a mesma para todo mundo. Para o átomo num par de caixas, a probabilidade quântica não é uma medida da incerteza de

alguém quanto ao que *é* mas a probabilidade do que qualquer um *observaria*. A interpretação de Ithaca considera a probabilidade objetiva como um conceito *primitivo*, impossível de ser ainda mais reduzido. Ithaca reduz os mistérios da mecânica quântica a esse único quebra-cabeça.

De acordo com Ithaca, a mecânica quântica nos diz que "correlações têm realidade física; aquilo que elas correlacionam não tem". Por exemplo, fótons gêmeos não observados não têm polarização *particular*, mas têm a *mesma* polarização. Apenas a *correlação* de suas polarizações é uma realidade física; as polarizações em si não são. Ou, por exemplo, se as posições de dois átomos estão emaranhadas, apenas sua separação é uma realidade, enquanto a posição de cada átomo não é.

E se, por exemplo, observarmos um fóton com um equipamento macroscópico cuja escala dá leituras diferentes para dois estados de polarização? Se considerarmos o equipamento do ponto de vista da mecânica quântica, ele meramente fica correlacionado com a polarização do fóton. Segundo a teoria quântica, a escala deveria fornecer ambas as leituras. Mas nós sempre a vemos fornecer uma leitura só, uma *ou* outra.

Eis como Mermin lida com isso na interpretação de Ithaca:

> Quando *eu* olho para a escala do aparelho *sei* o que a leitura está dizendo. Aquelas correlações do sistema global, absurdamente delicadas, irremediavelmente inacessíveis, *obviamente* somem completamente quando se conectam *comigo*. Seja porque a consciência está além da gama de fenômenos com que a mecânica quântica é capaz de lidar, seja porque ela tem infinitos graus de liberdade ou regras próprias especiais de superseleção, eu não teria a presunção de adivinhar. Mas esse é um quebra-cabeça referente à consciência que não deve ser misturado com os esforços para compreender a mecânica quântica como uma teoria de correlações de subsistemas no mundo não consciente [grifo do original].

Ithaca se abstém do encontro da física com a consciência confinando o enigma quântico ao problema da probabilidade objetiva. O encontro com a consciência não é negado. Ithaca atribui consciência a uma "realidade" maior que a "realidade física" à qual, pelo menos no momento presente, a física deveria se restringir. Essa interpretação modesta do enigma quântico simplesmente admite um mistério.

Informação quântica

Uma interpretação que tem ganhado força entre aqueles que estudam computação quântica poderia ser chamada de “interpretação da informação quântica”. Ela sustenta que a função de onda representa apenas *informação* sobre as medições possíveis de um sistema físico. A função de onda agora não deve ser identificada com o sistema físico de fato. Ela não *descreve* o sistema físico que está sendo considerado.

Nessa interpretação a função de onda, ou o estado quântico, fornece apenas um dispositivo matemático compacto para calcular as correlações entre observações, para prever o resultado de uma medição subsequente a partir de uma medição inicial. O estado quântico não é portanto uma coisa física objetiva, *é apenas conhecimento*. Essa interpretação pode ser vista como uma mistura da interpretação de Ithaca, com seu foco em correlações, e uma versão de Copenhague na qual Bohr diz que o propósito da lei física é “apenas seguir, até onde for possível, relações entre os múltiplos aspectos de nossa experiência”.

A interpretação da informação quântica foge do encontro com a consciência limitando o estado quântico a ser *conhecimento* sobre *observações* possíveis. Num certo sentido, limita portanto o escopo da teoria quântica a ser *apenas* sobre a consciência.

Lógica quântica

É considerando os experimentos que *poderíamos* ter feito, mas de fato *não* fizemos, que o enigma quântico surge. A lógica quântica nega que seja significativo *considerar* ações que não foram de fato feitas. Ela nega a determinação contrafactual. A lógica quântica “resolve” o enigma revisando as regras da lógica de modo a se encaixarem na teoria quântica.

A lógica quântica é um intrigante exercício intelectual e é a visão de alguns teóricos quânticos. No entanto, como *quaisquer* observações *concebíveis* podem

ser “explicadas” adotando-se regras de lógica que se encaixem, dificilmente ela provê uma resolução confortável do problema da medição quântica.

Além disso, em nossa experiência consciente, devemos considerar alternativas ao que poderíamos ou não poderíamos fazer. Negar a determinação contrafactual vai além de meramente negar o livre-arbítrio alegando que nossas escolhas são totalmente determinadas pela eletroquímica do nosso cérebro. Isso exige que nossas escolhas supostamente livres estejam completamente correlacionadas com a situação física externa. Seríamos então em essência robôs num mundo completamente determinista. Como resolução do enigma quântico, essa premissa, para usar as palavras de John Bell citadas no capítulo 13, “confundiria ainda mais a mente” do que o enigma que presume resolver.

GRW

Para explicar por que coisas grandes nunca são vistas em estados de superposição, Ghirardi, Rimini e Weber, com a “interpretação GRW”, modificam a equação de Schrödinger para fazer com que a função de onda colapse aleatoriamente de vez em quando. Para coisas pequenas como átomos, um colapso ocorre apenas a cada bilhão de anos ou algo assim.

Tal colapso infrequente não afetaria um experimento de interferência que tem lugar num tempo mais curto. Mas suponha um átomo que esteja em contato com seus átomos vizinhos de um objeto maior, digamos, o gato de Schrödinger em estado de superposição de vivo e morto. Esse átomo estaria emaranhado com seus vizinhos, e por meio deles emaranhado com todos os outros átomos do gato. O colapso aleatório desse átomo de suas duas posições em estado de superposição no gato simultaneamente vivo e morto para uma posição única característica do gato vivo ou do gato morto deflagraria o colapso do gato inteiro para o estado vivo *ou* morto. Há tantos átomos num gato que, mesmo que só um colapsasse a cada bilhão de anos, pelo menos um átomo colapsaria a cada micromicrossegundo. O gato poderia portanto permanecer apenas brevemente numa superposição de estados vivo e morto.

Estritamente falando, o esquema GRW não é uma *interpretação* da teoria, uma vez que propõe uma *mudança* dela. É uma mudança que permitiria que os objetos macroscópicos da nossa percepção fossem perfeitamente definidos *em* princípio, não só para todos os propósitos *práticos*. Tal resultado satisfaria a alguns.

Não há ainda nenhuma evidência experimental do fenômeno GRW. Além disso, à medida que experimentos com moléculas grandes mostram a transição para probabilidades do tipo clássico seguindo cálculos de decoerência, o ponto no qual o fenômeno GRW pode se tornar efetivo é forçado para objetos cada vez maiores. Isso deixaria a realidade de objetos menores que esse limiar, assim como sua falta de separabilidade, experimentalmente confirmada, como um enigma.

Interpretações de Penrose e Stapp

Duas propostas, uma de Roger Penrose e outra de Henry Stapp, poderiam ser chamadas de interpretações, mas na verdade incluem especulações físicas que envolvem a consciência. Nós as abordaremos no capítulo 17.

O que as interpretações podem conseguir?

Algumas interpretações da mecânica quântica resolvem o problema da medição para todos os propósitos práticos. É claro que nunca *houve* um problema, para todos os propósitos *práticos*. As previsões da teoria funcionam perfeitamente. É a estranha visão de mundo que os fatos experimentais exibem que nos faz perguntar: “O que está acontecendo?” A ampla gama das interpretações que hoje competem entre si mostra que questões profundas acerca do nosso mundo (ou acerca de nós?) estão escancaradas.

A mecânica quântica mostra que nossa visão de mundo cotidiana, razoável, é fundamentalmente falha. Interpretações do que a teoria nos diz oferecem diferentes visões de mundo. Mas cada uma delas envolve a misteriosa intromissão do observador consciente no mundo físico. Será possível que alguma interpretação da teoria ainda a ser proposta possa resolver o enigma sem um encontro com a consciência?

Não. O encontro com a consciência surge diretamente na demonstração experimental *neutra em termos de teoria quântica*. Portanto, nenhuma mera interpretação da *teoria* pode evitar o encontro. Mas toda interpretação permite à física evitar *lidar* com a consciência. Eis como John Wheeler apresenta essa dicotomia:

> Por mais útil que seja dizer nas circunstâncias do dia a dia que o mundo existe “lá fora” independentemente de nós, essa visão não pode mais ser sustentada. Existe um estranho sentido no qual este é um “Universo participativo”.

Mas, imediatamente depois dessa declaração, Wheeler alerta:

> A “consciência” não tem absolutamente nada a ver com o processo quântico. Estamos lidando com um fato que se faz conhecido por um irreversível ato de amplificação, por uma indelével gravação, um ato de registro … [*O significado*] é uma parte diferente da história, importante mas que não deve ser confundida com “fenômeno quântico”.

Consideramos isso como uma injunção aos físicos (como *físicos*) para que se concentrem nos fenômenos quânticos em si, não no *significado* dos fenômenos. Para todos os propósitos práticos, a teoria quântica não precisa de interpretação. Ela funciona perfeitamente ao prever os resultados de qualquer experimento particular que escolhamos.

NO ENTANTO, alguns de nós, como físicos, ou simplesmente como curiosos, ponderamos sobre o significado e tentamos entender o que está realmente acontecendo. Essa tem sido há bastante tempo uma atitude de muitos físicos eminentes (inclusive, às vezes, Wheeler). É uma atitude que hoje em dia ganha aceitação.

O crescimento dessa aceitação incomoda alguns físicos e estimula questionamentos. Além disso, as abordagens pseudocientíficas cada vez mais frequentes da mecânica quântica, como no filme *Quem somos nós?*, fazem os físicos se retorcer e servem de motivação para minimizar o enigma. Nós, físicos, tendemos a manter nosso esqueleto no armário, e alguns chegam a negar sua existência.

Por exemplo, em 1998, um artigo intitulado “Quantum theory without observers”, ocupando dois números da revista *Physics Today*, argumentava que diversas interpretações, principalmente a de Bohm, *eliminam* o papel do observador na mecânica quântica. (O próprio Bohm, conforme citado acima, não concordaria.) Quando tais argumentos são apresentados, geralmente fica pouco claro se tal eliminação do observador é proposta *em princípio* ou meramente como uma solução do enigma quântico para todos os propósitos *práticos* – uma Fapptrap [a cilada de Fapp], para usar a ironia de Bell para o argumento “para todos os propósitos práticos” quando se presume que ele resolva problemas fundamentais. Embora a atitude desse artigo na *Physics Today* possivelmente condiga com as simpatias da maioria da comunidade física atual, os tempos estão mudando.

Oito décadas depois da equação de Schrödinger, o significado do encontro da física com a consciência ainda está em discussão. Quando especialistas não entram num acordo, você pode escolher seu especialista. Ou fazer suas próprias especulações.

“O que está acontecendo?” ainda é uma pergunta em aberto, e que nos motiva a voltar a uma das epígrafes do início deste capítulo: “Você sabe que algo está acontecendo aqui, mas não sabe o que é.”

Começando com a mecânica quântica, encontramos a consciência. Nosso próximo capítulo começa com a consciência e aborda o encontro a partir da outra direção.

---

[e] Uma tradução aproximada poderia ser: “Que #$* nós sabemos?”. O filme recebeu no Brasil o título *Quem somos nós?*. (N.T.)

16. O mistério da consciência

> O que é chamado de consciência nós não precisamos discutir;
> está além de toda e qualquer dúvida.
>
> SIGMUND FREUD

> A consciência apresenta os problemas mais estarrecedores na ciência da mente. Não há nada que conheçamos mais intimamente que a experiência consciente, mas não há nada mais difícil de explicar.
>
> DAVID CHALMERS

SERÁ QUE A CONSCIÊNCIA faz colapsar funções de onda? Essa pergunta, levantada no começo da teoria quântica, não pode ser respondida. Não pode sequer ser bem formulada. A consciência em si é um mistério.

Quando descrevemos os fatos quânticos experimentalmente demonstrados e a explicação desses fatos pela teoria (distinta das diversas interpretações da teoria que competem entre si), apresentamos o consenso não questionado da comunidade da física. Não podemos descrever tal consenso na nossa discussão sobre a consciência. Ele não existe. É claro que há uma grande quantidade de dados experimentais indiscutíveis, mas explicações diametralmente opostas são intensamente sustentadas. Temos nossa própria opinião, mas, como você poderá notar, nós oscilamos.

Até a década de 1960, a psicologia dominada pelo behaviorismo evitava o termo “consciência” em qualquer discussão que se presumisse científica. Desde então houve uma explosão de interesse pela consciência. Alguns a atribuem à impressionante evolução da tecnologia de imagem cerebral que permitiu ver que partes do cérebro se tornam ativas com estímulos específicos. Mas segundo um editor do *Journal of Consciousness Studies*:

> É mais provável que o ressurgimento dos estudos da consciência tenha ocorrido por razões sociológicas. Os estudantes dos anos 1960, que desfrutaram de uma rica abordagem extracurricular de “estudos da consciência” (mesmo que alguns deles não tragassem), agora estão dirigindo os departamentos de ciências.

O interesse pelos fundamentos da mecânica quântica cresce ao mesmo tempo que pela consciência. E conexões são seriamente propostas. Há algo no ar.

O que é consciência?

Já falamos de consciência mas nunca a definimos totalmente. As definições de "consciência" no dicionário não são muito melhores que as de "física". Temos usado "consciência" aproximadamente como equivalente de "senso" de consciência.[f] Para nós, "consciência" decididamente inclui a percepção de livre escolha pelo experimentador. Esse uso do termo "consciência" é o padrão na abordagem do problema da medição quântica. Em última análise, uma definição se manifesta pelo *uso* do termo. (Como disse Humpty Dumpty a Alice: "Quando *eu* uso uma palavra … ela significa exatamente o que eu escolho que signifique", e o filósofo Wittgenstein, que ensinava que uma palavra é *definida* por seu uso, de certa forma concordaria.)

Não se pode saber da existência da consciência de *nenhum* outro jeito além de mediante nosso senso de consciência em primeira pessoa, ou relatos em segunda pessoa de outros. (No próximo capítulo sugerimos um aparente desafio quântico a essa limitação.)

Não vamos discutir muitas das coisas encontradas nos debates sobre consciência do ponto de vista psicológico. Por exemplo, não falaremos sobre ilusões ópticas, distúrbios mentais, autoconsciência ou a sede das emoções ocultas de Freud, o *in*consciente. Tampouco discutiremos as muitas teorias de consciência, ainda impossíveis de testar, presentes na literatura atual que não incluam o enigma quântico.

Nossa preocupação é com a "consciência" relacionada com a livre escolha do experimento por parte do observador, a consciência que a física encontra. Uma ligação de certo modo mais próxima com a psicologia e a neurologia surgirá quando em breve abordarmos o "problema difícil da consciência" de Chalmers.

Nosso exemplo frequente do encontro da física com a consciência é a decisão de observar um objeto numa caixa única *fazendo com que* esteja totalmente ali. Dizemos “fazendo com que” somente porque presumivelmente o observador *poderia* ter escolhido uma observação de interferência estabelecendo uma situação contrária – que o objeto *não* estivesse totalmente numa caixa única. Assumimos que o observador poderia ter escolhido estabelecer que o objeto fosse uma onda simultaneamente em duas caixas.

Será que tal demonstração requer necessariamente um observador *consciente*? Afinal, não poderia um robô não consciente, ou mesmo um contador Geiger, fazer a observação? Depende do que se entende por “observação”. Por enquanto, basta lembrar que, se esse robô ou contador Geiger estivesse isolado do resto do mundo e obedecesse à teoria quântica, ele meramente se emaranharia e se tornaria parte de um estado de superposição total – como o gato de Schrödinger. Nesse sentido, ele não *observaria*.

O enigma quântico surge a partir da *premissa* de que experimentadores podem escolher livremente entre dois experimentos, que por sua vez geram resultados *contraditórios*. Assumimos que os experimentadores tinham “livre-arbítrio” para fazer tal escolha. No entanto, não podemos fugir do enigma quântico negando o livre-arbítrio dos experimentadores, isto é, simplesmente fazendo com que suas escolhas sejam de alguma forma determinadas pela eletroquímica dos seus cérebros. Para fugir do enigma quântico, a negação do livre-arbítrio requerida precisa ir além. Precisa incluir a negação da determinação contrafactual. Essa negação deve incluir a premissa de um mundo “conspiratório”. (No nosso exemplo, as “escolhas” dos experimentadores teriam de combinar com a situação física nos pares de caixas.)

As discussões atuais sobre o livre-arbítrio em psicologia e neurofisiologia geralmente se concentram mais estreitamente em questionar se as escolhas que fazemos são de certo modo predeterminadas pela eletroquímica do nosso cérebro. *Essa* questão do livre-arbítrio é portanto periférica ao enigma quântico. Mas o “livre-arbítrio” aparece constantemente em conexão com o enigma

quântico. Então, pelo menos por enquanto, vamos falar desse livre-arbítrio limitado.

Livre-arbítrio

Problemas com livre-arbítrio surgem em diversos contextos. Eis um contexto antigo: como Deus é onipotente, pareceria injusto que sejamos considerados responsáveis por *qualquer coisa* que façamos. Deus, afinal, possui o controle. Teólogos medievais resolveram essa questão decidindo que cada sequência de eventos começa com uma "causa eficiente remota" e termina com uma "causa final", ambas nas mãos de Deus. As causas intermediárias surgem a partir de nossas livres escolhas, pelas quais seremos considerados responsáveis no dia do juízo.

Essa preocupação medieval não é completamente distante daquela dos filósofos da moralidade de hoje. E advogados de defesa criminais dão a ela roupagem prática argumentando que as ações do réu foram determinadas pela genética e pelo meio ambiente, e não pelo livre-arbítrio. Nós, porém, iremos tratar de uma questão sobre o livre-arbítrio mais franca e direta.

A FÍSICA CLÁSSICA, a física newtoniana, é completamente determinista. Um "olho que tudo vê", observando a situação do Universo num dado instante, pode saber todo o seu futuro. Se a física clássica se aplicasse a *tudo*, não haveria lugar para o livre-arbítrio.

No entanto, o livre-arbítrio pode coexistir alegremente com a física clássica. No capítulo 3, sobre a visão de mundo newtoniana, contamos como a física, em tempos passados, podia parar na fronteira do corpo humano, ou com certeza no então completamente misterioso cérebro. Cientistas podiam desconsiderar o livre-arbítrio como uma preocupação que não era sua, deixando-o para filósofos e teólogos.

Essa desobrigação não acontece com a mesma facilidade nos dias de hoje, na medida em que os cientistas estudam o funcionamento do cérebro, sua

eletroquímica e suas respostas a estímulos. Eles lidam com o cérebro como objeto físico cujo comportamento é governado por leis físicas. O livre-arbítrio não se encaixa imediatamente nessa realidade – ele fica à espreita num canto, como um fantasma.

A maioria dos neurologistas e psicólogos ignora tacitamente esse canto. Alguns, talvez, sendo mais consistentes em termos lógicos, negam que o livre-arbítrio exista e alegam que nossa *percepção* de livre-arbítrio é uma ilusão. A controvérsia criada por isso estará bem na nossa frente quando discutirmos em breve o "problema difícil" da consciência.

COMO SERIA POSSÍVEL *demonstrar* a existência do livre-arbítrio? Talvez tudo o que tenhamos seja nossa sensação de livre-arbítrio e a alegação de livre-arbítrio que outros fazem. Se nenhuma demonstração é possível, talvez a existência do livre-arbítrio seja destituída de sentido. Eis uma objeção a tal argumento: embora você não possa demonstrar a outra pessoa sua sensação de dor, você sabe que ela existe e com toda certeza não é destituída de sentido.

Um famoso experimento de livre-arbítrio gerou ferozes discussões. No começo dos anos 1980, Benjamin Libet fez seus participantes flexionarem o pulso num momento que bem escolhessem, mas sem pensar com antecedência. Ele determinou a ordem de três momentos críticos: o momento do "potencial de prontidão", uma voltagem que pode ser detectada com eletrodos no couro cabeludo um segundo antes de qualquer ação voluntária de fato ocorrer; o instante do flexionamento do pulso; e o instante que os sujeitos relataram ter tomado sua *decisão* de flexionar (observando um cronômetro).

Seria de se esperar que a ordem fosse (1) decisão, (2) potencial de prontidão, (3) ação. Na verdade, o potencial de prontidão *precedia* o instante de decisão reportado. Será que isso mostra que alguma função determinista no cérebro provocou a decisão supostamente livre? Alguns, não necessariamente Libet, argumentam dessa maneira. Mas os tempos envolvidos são frações de segundo, e o significado do instante de decisão reportado é difícil de avaliar. Além disso,

como a ação do pulso é supostamente iniciada sem "planejamento prévio", o resultado experimental parece, na melhor das hipóteses, uma evidência ambígua contra o livre-arbítrio consciente.

EM 2008, John-Dylan Haynes foi além da fração de segundo. Ele e seus colegas monitoraram a atividade neural com imagens por ressonância magnética funcional (IRMf).[g] À medida que letras iam aparecendo numa tela diante deles, os sujeitos eram solicitados a apertar o botão à direita ou à esquerda sempre que tivessem vontade, ou aleatoriamente. Então informavam a letra que tinham visto quando *decidiram* qual botão apertar. A partir do sinal de IRMf, os pesquisadores puderam prever 70% das vezes (adivinhações funcionam 50%) o botão que seria apertado, até dez segundos antes do momento de decisão informado. Haynes comentou: "Isso não exclui o livre-arbítrio, mas sim o torna implausível."

Será que é isso mesmo? Presumivelmente, se dissessem a um sujeito *durante* esse intervalo de dez segundos "Você vai apertar o botão da esquerda", ele ainda assim poderia escolher apertar o botão da direita. Ser capaz de prever aproximadamente o comportamento de alguém a partir de IRMf não questiona seriamente seu livre-arbítrio. Prever comportamento a partir de expressão facial também funciona muito bem.

A CRENÇA EM NOSSO LIVRE-ARBÍTRIO surge a partir da nossa percepção consciente de que fazemos escolhas entre alternativas possíveis. Se o livre-arbítrio é apenas uma ilusão, e somos todos simplesmente sofisticados robôs controlados pela nossa neuroquímica com talvez um pouquinho de aleatoriedade térmica, será que nossa consciência também é uma ilusão? (Se assim for, o que é que está *tendo* essa ilusão?)

Embora seja difícil encaixar o livre-arbítrio numa visão de mundo científica, nós mesmos não podemos duvidar dele seriamente. O comentário de J.A. Hobson parece apropriado para nós: "Aqueles de nós com senso comum ficam

perplexos com a resistência mostrada por psicólogos, fisiologistas e filósofos à realidade óbvia do livre-arbítrio."

SE VOCÊ VAI NEGAR o livre-arbítrio, parar na eletroquímica do cérebro é arbitrário. Afinal, a motivação para sugerir tal negação é o determinismo newtoniano da física clássica. Sendo logicamente consistentes, e portanto aceitando o raciocínio até o fim, chegamos ao mundo *completamente* determinista onde o "olho que tudo vê" pode saber o futuro inteiro de tudo, inclusive da escolha supostamente livre do experimentador conduzindo ao enigma quântico.

Em vez de parar na eletroquímica do cérebro, aceitar o determinismo *completo* foge *sim* do enigma quântico. Para a maioria de nós, ser "robôs" num mundo completamente determinista é demais para engolir. No entanto, aceitando tanto o livre-arbítrio quanto os indiscutíveis experimentos quânticos, chegamos ao enigma quântico. E à teoria quântica para uma explicação.

E a teoria quântica, ao contrário da física clássica, não é uma teoria do mundo físico independente das decisões livremente tomadas pelo experimentador, seu livre-arbítrio.

Segundo John Bell:

> Acabou se revelando que a mecânica quântica não pode ser "completada" numa teoria localmente causal, pelo menos enquanto forem permitidos … experimentadores operando livremente.

Antes do teorema de Bell, o "livre-arbítrio" – ou a premissa explícita de "experimentadores operando livremente" – não era algo que se visse num livro de física. E com certeza não numa *publicação* séria de física. Isso obviamente está mudando. Em dezembro de 2010, por exemplo, a prestigiosa revista científica *Physical Review Letters* publicou um cálculo de quanto livre-arbítrio precisamente teria de ser abandonado para explicar as correlações observadas por experimentadores operando livremente na execução de experimentos de fótons gêmeos. O resultado é 14%. O que isso significa em termos humanos não está claro.

Vamos explorar a observação dos “experimentadores operando livremente” de Bell. Recordemos o enunciado definidor da interpretação de Copenhague feito por Pascual Jordan, a interpretação do físico que trabalha com isso: “Observações não só *perturbam* o que deve ser medido, elas o *produzem*.” Aqui “observação” é um termo aberto, mas a criação da realidade física por *qualquer* tipo de observação é difícil de aceitar. No entanto, não é uma noção nova.

De Berkeley ao behaviorismo

A ideia de a realidade física ser criada por sua observação remonta a milhares de anos, à filosofia védica, mas vamos saltar adiante, até o século XVIII. Na esteira da mecânica newtoniana, a visão materialista de que tudo o que existe é matéria governada por forças mecânicas ganhou ampla aceitação. Nem todo mundo ficou contente com isso.

O filósofo idealista George Berkeley achava que o pensamento newtoniano diminuía nosso status de seres morais capazes de escolher livremente. O fato de a física clássica deixar pouco espaço para Deus o deixava atordoado. Afinal das contas, ele era bispo. (Naquele tempo era comum acadêmicos ingleses serem ordenados sacerdotes anglicanos, embora o celibato da época de Newton não fosse mais exigido. Berkeley era casado.)

Berkeley rejeitava o materialismo com o lema *esse est percipi*, "ser é ser percebido", querendo dizer que tudo o que existe é criado pela sua observação. Para a velha pergunta "Se uma árvore cai com ninguém por perto para ouvi-la cair, há algum som?" a resposta de Berkeley presumivelmente seria que nem sequer havia uma árvore se não fosse observada.

Embora a postura quase solipsista de Berkeley possa parecer um pouco maluca, muitos filósofos idealistas da época eram entusiastas dela. Não era o caso de Samuel Johnson, que supostamente teria respondido chutando uma pedra, ferindo o dedão e declarando: "Eu o refuto assim!" Chutar pedras causou pouca impressão entre os defensores do pensamento de Berkeley, que, obviamente, é impossível refutar.

Embora esta não seja exatamente a posição de Berkeley, eis um versinho muito antigo que ilustra a atenção que recebiam tais ideias:

There was a young fellow named Todd
Who said, "It's exceedingly odd

To think that this tree
Should continue to be
When there's no one about in the Quad."[h]

A resposta:

There is nothing especially odd;
I am always about in the Quad.
And that's why this tree
Can continue to be
When observed by
Yours faithfully, God.[i]

Deus pode ser onipotente, mas, notamos no espírito do versinho, Ele não é onisciente. Se a observação de Deus faz colapsar a função de onda de coisas grandes para a realidade, experimentos quânticos indicam que Ele não está observando os pequenos.

A ideia de que o mundo ao nosso redor estava sendo criado por sua observação nunca pegou. A maioria das pessoas práticas, seguramente a maioria dos cientistas do século XVIII, considerava que o mundo era feito de pequenas partículas sólidas, que alguns chamavam de "átomos". Presumia-se que estes obedeciam a leis mecânicas muito como acontecia com aquelas partículas maiores, os planetas. Embora cientistas físicos pudessem especular sobre a mente, e alguns tenham usado imagens hidráulicas para isso em vez dos modelos de computador atuais, a maioria fazia questão de ignorar o assunto.

NO SÉCULO XIX e em grande parte do século XX, o pensamento científico geralmente era equiparado ao pensamento materialista. Mesmo nos departamentos de psicologia, a consciência não merecia um estudo sério. O behaviorismo tornou-se a visão dominante. As pessoas deviam ser estudadas como "caixas pretas" que recebiam estímulos como *input* e forneciam comportamentos como *output*. A ciência só precisava correlacionar comportamentos e estímulos para discorrer sobre o que se passava no interior. Se

você soubesse o comportamento correspondente a cada estímulo, saberia tudo o que há para conhecer sobre a mente.

A abordagem behaviorista teve sucesso em revelar como as pessoas respondem e, em certo sentido, porque agem da maneira que agem. Mas ela nem sequer abordava o estado *interior*, a sensação de consciência, a tomada de decisão em escolhas aparentemente livres. Segundo o principal porta-voz do behaviorismo, B.F. Skinner, a premissa de um livre-arbítrio consciente não era científica. Mas, com a ascensão da psicologia humanista na parte final do século XX, as ideias behavioristas começaram a parecer estéreis.

O “problema difícil” da consciência

O behaviorismo estava em declínio quando, no começo dos anos 1990, David Chalmers, um jovem filósofo australiano, abalou o estudo da consciência identificando o “problema difícil” da consciência. Em poucas palavras, o problema difícil é explicar como o cérebro biológico gera o mundo interior, subjetivo, da *experiência*. Os “problemas fáceis” de Chalmers incluem coisas como a reação a estímulos e a capacidade de descrever estados mentais – e todo o resto dos estudos da consciência. Chalmers não insinua que seus problemas fáceis sejam fáceis num sentido absoluto. São fáceis apenas em relação ao problema difícil. Nosso interesse presente no problema difícil da consciência, ou senso de consciência, ou experiência, surge de sua aparente semelhança (e conexão?) com o problema difícil da mecânica quântica, o problema da observação.

Antes de prosseguir sobre o problema difícil e as acaloradas discussões que ele continua a gerar, um bocadinho acerca de David Chalmers. Como estudante de graduação, estudou física e matemática, e trabalhou também com matemática na pós-graduação antes de mudar para a filosofia. Embora não seja central no seu argumento, Chalmers considera que a mecânica quântica provavelmente é relevante para a consciência. O último capítulo de seu livro, *The Conscious Mind*, uma obra de referência, leva o título “A interpretação da mecânica quântica”. David Chalmers foi um colega professor na Universidade da Califórnia em Santa Cruz, no departamento de filosofia, antes de se mudar (para nosso pesar) para a Universidade do Arizona e se tornar diretor do Centro de Estudos da Consciência. Ele está, no momento em que escrevemos este livro, de volta à sua Austrália natal, como diretor do Centro da Consciência da Universidade Nacional da Austrália.

Os problemas fáceis de Chalmers frequentemente envolvem a correlação de atividade neural com aspectos da consciência, os “correlatos neurais da consciência”. A tecnologia de imagem cerebral atual permite uma visualização detalhada da atividade metabólica dentro do cérebro pensando e sentindo, e tem estimulado estudos fascinantes dos processos de pensamento.

A exploração do que se passa dentro do cérebro não é nova. Neurocirurgiões já correlacionam há muito tempo a atividade e estimulação elétricas com informes de percepção consciente colocando eletrodos diretamente no cérebro exposto. Isso é feito em grande parte com propósitos terapêuticos, é claro, e a experimentação científica é limitada. A eletroencefalografia (EEG), a detecção de potenciais elétricos no couro cabeludo, é ainda mais antiga. A EEG pode detectar rapidamente atividade neural mas não pode dizer em que local do cérebro a atividade está ocorrendo.

A tomografia por emissão de pósitrons (PET, na sigla em inglês) é melhor para descobrir exatamente onde no cérebro os neurônios estão em atividade. Aqui, átomos radiativos, de oxigênio, por exemplo, são injetados na corrente sanguínea. Detectores de radiação e análise computadorizada podem determinar onde há aumento de atividade metabólica requisitando mais oxigênio e correlacionar esse fato com relatos de percepções conscientes.

A tecnologia de imagem cerebral mais espetacular é a imagem por ressonância magnética funcional (IRMf). É melhor que a PET para localizar atividade e não envolve radiação. (No entanto, a cabeça examinada precisa ser mantida parada, quieta, num grande e barulhento ímã.) A IRM é a tecnologia médica de imagem que descrevemos no capítulo 9 como uma das aplicações práticas da mecânica quântica. A IRMf é capaz de identificar qual parte do cérebro está usando mais oxigênio durante uma função cerebral particular, respondendo a um estímulo externo.

A IRMf pode correlacionar uma região do cérebro com os processos neurais envolvidos em, digamos, memória, fala, visão e consciência reportada. As imagens cerebrais geradas por computador, artificialmente coloridas, podem exibir exatamente quais regiões do cérebro requerem mais sangue quando

alguém está pensando, digamos, em comida ou sentindo dor. Como qualquer técnica baseada em atividade metabólica, a IRMf não é rápida.

SERÁ O CÉREBRO *físico* que essas técnicas observam, presumivelmente, tudo aquilo que o cérebro é, e também tudo aquilo que a mente é? Embora o trabalho atual que relaciona a eletroquímica neural à consciência possa ser rudimentar, suponha que uma IRMf aperfeiçoada, ou alguma tecnologia futura, pudesse identificar *completamente* ativações cerebrais particulares com certas experiências conscientes. Isso correlacionaria todas as sensações conscientes (reportadas) com a atividade metabólica, e talvez até mesmo com os fenômenos eletroquímicos subjacentes. Tal conjunto completo de correlatos neurais da consciência é o objetivo de grande parte da pesquisa atual sobre consciência envolvendo o cérebro.

Caso esse objetivo fosse realmente atingido, alguns dizem que teríamos conseguido tudo o que *pode* ser conseguido. A consciência, argumentam eles, seria completamente explicada porque não existe nada nela *além* da atividade neural que correlacionamos com as experiências que *chamamos* de "consciência". Se desmontarmos um velho relógio de pêndulo para ver como o peso oscilante guiado por uma mola move as engrenagens, poderemos descobrir tudo o que há para saber sobre o funcionamento do relógio. O argumento aqui é que a consciência será explicada de maneira similar com o que aprendermos acerca dos neurônios que formam o cérebro.

Francis Crick, físico codescobridor da dupla hélice do DNA, que se tornou cientista cerebral, estava à procura de um "neurônio do senso de consciência". Para ele, nossa experiência subjetiva – nossa consciência – nada mais é que a atividade de tais neurônios. Seu livro *A hipótese espantosa* identifica tal possibilidade:

> "Você", suas alegrias e tristezas, suas memórias e suas ambições, seu senso de identidade pessoal e livre-arbítrio, na verdade nada mais é que o comportamento de uma vasta reunião de células nervosas e moléculas a elas associadas.

SE ASSIM FOR, nossa sensação de que consciência e livre-arbítrio são experiências além do mero funcionamento de elétrons e moléculas é uma ilusão. A consciência deveria portanto ter, em última análise, uma explicação reducionista. Deveria, pelo menos em princípio, ser totalmente descritível em termos de entidades mais simples, os correlatos neurais da consciência. Sensações subjetivas "emergem" portanto da eletroquímica dos neurônios. Isso é próximo da ideia prontamente aceita de que a tensão superficial ou o "molhado" da água emerge da interação de átomos de hidrogênio e oxigênio formando moléculas contíguas de H_2O.

Tal decorrência forma a "espantosa hipótese" de Crick. Será realmente tão estarrecedora? Desconfiamos que, pelo menos para a maioria dos físicos, pareceria o palpite mais natural.

Um colaborador mais jovem e de longa data de Crick, Christof Koch, adota uma abordagem com mais nuances:

> Dada a centralidade das sensações subjetivas na vida cotidiana, seria necessária uma extraordinária evidência factual antes de concluir que *qualia* e sensações são ilusórios. A abordagem provisória que adoto é considerar experiências em primeira pessoa como fatos brutos da vida e buscar explicá-los.

Num contexto ligeiramente diferente Koch vai adiante, equilibrando visões diferentes:

> Embora não possa excluir que explicar a consciência talvez exija leis fundamentalmente novas, atualmente não vejo necessidade premente de dar tal passo.
>
> … [Mas] os caráteres dos estados cerebrais e dos estados fenomenológicos [estados vivenciados] parecem diferentes demais para ser completamente redutíveis um ao outro. Suspeito que sua relação seja mais complexa do que tradicionalmente se imagina.

David Chalmers, o principal porta-voz de um ponto de vista diametralmente oposto ao de Crick, considera *impossível* explicar a consciência puramente em termos de correlatos neurais. Na melhor das hipóteses, sustenta ele, tais teorias nos dizem alguma coisa sobre o papel *físico* que a consciência pode desempenhar, mas essas teorias físicas não nos dizem como a consciência surge:

> Para qualquer processo físico que especifiquemos haverá uma pergunta não respondida: por que esse processo daria origem à experiência [consciente]? Dado qualquer um desses processos, é conceitualmente coerente que ele poderia … [existir] na ausência da experiência. Segue-se que nenhuma mera presença de um processo físico nos dirá por que a experiência emerge. O surgimento da experiência vai além do que pode ser deduzido a partir da teoria física.

Embora a teoria atômica possa explicar redutivamente o molhado da água e o motivo de ela grudar no seu dedo, isso está bem longe de explicar a sua *sensação* de molhado. Chalmers, negando a possibilidade de *qualquer* explicação redutiva da consciência, sugere que uma teoria da consciência deve tomar a experiência como entidade básica, junto com massa, carga e espaço-tempo. Ele sugere que essa nova propriedade fundamental possibilitaria novas leis fundamentais, que ele chama de “princípios psicofísicos”.

Chalmers vai adiante, especulando sobre tais princípios. Aquele que ele considera básico, e que é o mais interessante para nós, conduz a uma “hipótese natural de que a informação (pelo menos alguma informação) tem dois aspectos básicos, um físico e um fenomenológico”. Esse postulado de um dualismo lembra a situação da mecânica quântica, onde a função de onda também tem dois aspectos. De um lado, é a realidade física total de um objeto; de outro, essa realidade, conjecturaram alguns, é puramente “informação” (seja lá o que isso queira dizer).

Para argumentar que a experiência consciente vai além do saber habitual, alguns contam a história de Maria, uma cientista do futuro que sabe *tudo o que* há para saber sobre a percepção de cor. Mas ela nunca esteve fora de uma sala onde tudo é preto ou branco. Um dia alguém lhe mostra algo vermelho. Pela primeira vez, Maria *vivencia* o vermelho. Sua experiência do vermelho é algo que vai *além* do seu completo conhecimento do vermelho. Será mesmo? Sem dúvida, você pode criar sozinho os argumentos pró e contra que a história de Maria provoca.

O FILÓSOFO DANIEL DENNETT, em seu amplamente citado livro *Consciousness Explained*, descreve a forma com que o cérebro lida com a informação como um processo em que "múltiplos rascunhos" sofrem constante edição, às vezes se fundindo para produzir experiência. Dennett nega a existência de um "problema difícil", considerando-o uma forma de dualismo mente-cérebro. Ele alega refutá-lo com o argumento:

> Nenhuma massa ou energia física é associada a eles [os sinais da mente para o cérebro]. Como então fazem diferença para o que acontece nas células cerebrais que eles devem afetar, se é para a mente ter alguma influência sobre o corpo? … Esse confronto entre uma física bastante padrão e o dualismo … é largamente encarado como a falha inescapável e fatal do dualismo.

Como Chalmers argumenta que a consciência obedece a princípios que estão *além* da física padrão, não fica claro que um argumento *baseado* na "física bastante padrão" possa ser uma refutação de Chalmers. Além disso, há um furo quântico no argumento de Dennett: não é necessária nenhuma massa ou energia para determinar em *qual* dos vários estados possíveis uma função de onda vai colapsar sob observação.

NOSSA PRÓPRIA PREOCUPAÇÃO com o problema difícil surge, é claro, porque a física encontrou a consciência no enigma quântico, que os físicos chamam de "problema da medição". Aqui, aspectos da observação física chegam perto daqueles da experiência consciente. Em ambos os casos, algo *além* do tratamento normal da física ou da psicologia parece ser necessário para uma solução.

A natureza essencial do problema da medição em mecânica quântica tem estado em discussão desde a criação da teoria quântica. Da mesma maneira, desde que a consciência passou a ser cientificamente analisada pela psicologia e pela filosofia, sua natureza essencial tem sido debatida. Um exemplo da extrema divergência de opiniões apareceu no *New York Times* em 2005, quando alguns cientistas eminentes foram solicitados a declarar suas convicções. Segundo o cientista cognitivo Donald Hoffman:

> Acredito que a consciência e seu conteúdo são tudo o que existe. Espaço-tempo, matéria e campos nunca foram os habitantes fundamentais do Universo, mas têm estado sempre, desde seu início, entre o conteúdo mais modesto da consciência, dependendo dela para seu próprio existir.

O psicólogo Nicholas Humphrey vê de outro modo:

> Acredito que a consciência humana é um truque de mágico, projetado para nos iludir e levar a pensar que estamos na presença de um mistério inexplicável.

Um jeito de explorar a natureza da consciência, e sua existência, é perguntar quem ou o que pode possuí-la.

Um computador consciente?

Cada um de nós *sabe* que somos conscientes. Talvez a única evidência para acreditar que os outros são conscientes é que eles se parecem mais ou menos conosco e se comportam como nós. Que outra evidência há? A pressuposição de que nossos colegas humanos são conscientes está tão entranhada que é difícil expressar os motivos para acreditarmos nisso.

Até onde na escala a consciência se estende? Que tal gatos e cachorros? E minhocas ou bactérias? Alguns filósofos veem um *continuum* e chegam a atribuir um pouco de consciência a um termostato. Por outro lado, talvez a consciência apareça abruptamente em algum ponto dessa escala. Afinal, a natureza pode ser descontínua: abaixo de zero grau Celsius, a água se transforma abruptamente em gelo sólido.

VAMOS NOS DISTANCIAR um pouco da consciência e falar simplesmente sobre "pensar" ou inteligência. Hoje, sistemas de computadores chamados de inteligência artificial, ou IA, auxiliam médicos a diagnosticar enfermidades, generais a planejar batalhas, engenheiros a projetar computadores ainda melhores. Em 1997, o Deep Blue da IBM venceu o campeão mundial de xadrez, Garry Kasparov.

O Deep Blue *pensava*? Depende do que se entende por pensar. O teórico da informação Claude Shannon, ao ser indagado se os computadores algum dia pensarão, supostamente retrucou: "É claro. Eu sou um computador, e eu penso." Mas os cientistas da IBM que projetaram o Deep Blue insistem que sua máquina é apenas uma calculadora rápida avaliando 100 milhões de posições de xadrez num piscar de olhos. Pensando ou não, o Deep Blue seguramente não é consciente.

Mas, se um computador *parecesse* consciente sob todos os aspectos, não teríamos de aceitá-lo como consciente? Deveríamos seguir o princípio consagrado pelo tempo de que, se a coisa parece um pato, anda como pato e grasna como pato, deve ser um pato.

A questão interessante é, se é possível *construir* um computador consciente, portanto um robô consciente. A consciência do computador às vezes é chamada de "IA *forte*". (Seria assassinato tirar da tomada um robô verdadeiramente consciente?) "Provas" lógicas têm sido apresentadas de que a IA forte é, em princípio, possível. Há outras "provas" de que é impossível. Como se poderia saber se um computador é consciente?

Em 1950 Alan Turing propôs um teste para a consciência do computador. Na verdade, Turing se referiu a ele como um teste para descobrir se um computador podia pensar; naquela época um cientista não usaria o termo "consciência". (Turing também projetou o primeiro computador programado e desenvolveu um teorema sobre o que computadores podiam em última análise fazer ou não. Turing mais tarde foi preso por homossexualidade e em 1954 cometeu suicídio. Muitos anos depois de sua morte, funcionários governamentais revelaram que foi Turing quem quebrou o código alemão Enigma. Os Aliados foram assim capazes de ler as mensagens mais secretas do inimigo, provavelmente abreviando a Segunda Guerra Mundial em muitos meses.)

Para decidir se um computador é consciente, o teste de Turing usa essencialmente os mesmos critérios que utilizamos para atribuir consciência a outro indivíduo: ele se parece e se comporta mais ou menos como eu? Não nos preocupemos com a parte do "parece"; um robô de *aparência* humana sem dúvida nenhuma pode ser construído. A questão é se seu cérebro computadorizado lhe dá consciência.

Para testar se um dado computador é consciente, deve ser suficiente, segundo Turing, comunicar-se com ele por meio de um teclado e manter qualquer conversa, pelo tempo que se queira. Se você não conseguir saber se está se comunicando com um computador ou com outro ser humano, ele passa no teste de Turing. Alguns diriam então que você não pode negar que ele seja consciente.

Certo dia numa aula, eu (Bruce) casualmente comentei que qualquer ser humano poderia facilmente passar num teste de Turing. Uma moça contestou: "Eu já *namorei* sujeitos que não conseguiriam passar num teste de Turing!"

A consciência é um mistério que exploramos porque o encontro da física com ela nos apresenta o enigma quântico. No próximo capítulo, o mistério encontra o enigma.

---

[f] Os autores aqui usam os termos *consciousness* e *awareness*. Em português costumam ser equivalentes, sendo ambos traduzidos por "consciência". Algumas tentativas de dar outros significados a *awareness* incluem: sensação de presença, sensação de consciência, senso de consciência, consciência "consciente", percepção etc.; da mesma forma, *aware* pode significar ciente, cônscio, consciente, atento, ter presente etc. (N.T.)

[g] Frequentemente usa-se a sigla em inglês fMRI – *functional magnetic ressonance imaging*. (N.T.)

[h] Havia um rapaz chamado Todd/ Que disse: "É esquisito demais/ Pensar que esta árvore/ Deva continuar a existir/ Quando não há ninguém por perto no Pátio." (N.T.)

[i] Não há nada especialmente esquisito;/ Estou sempre no Pátio./ E é por isso que a árvore/ Pode continuar a existir/ Quando observada por/ Sinceramente seu, Deus. (N.T.)

17. O encontro do mistério com o enigma

> Quando o domínio da teoria física foi estendido para abranger fenômenos microscópicos por meio da criação da mecânica quântica, o conceito de consciência voltou novamente para o primeiro plano: não era possível formular as leis da mecânica quântica de maneira totalmente consistente sem referência à consciência.
>
> EUGENE WIGNER

> Quando há dois mistérios, é tentador supor que tenham uma fonte comum. Essa tentação é ampliada pelo fato de que os problemas da mecânica quântica parecem profundamente ligados à noção da presença do observador, envolvendo crucialmente a relação entre a experiência de um sujeito e o resto do mundo.
>
> DAVID CHALMERS

O ENIGMA QUÂNTICO e a consciência não são apenas dois mistérios, são *os* dois mistérios. O primeiro, a demonstração experimental do enigma quântico, nos confronta com o mistério do mundo físico objetivo “lá fora”; o segundo, o senso de consciência, nos confronta com o mistério fundamental do mundo mental subjetivo, “aqui dentro”. A mecânica quântica parece conectar os dois.

O encontro “oficialmente” proclamado

Em seu tratado de 1932, *The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, John von Neumann mostrou rigorosamente o inevitável encontro da teoria quântica com a consciência. Von Neumann considerou uma medição quântica idealizada, começando com um objeto microscópico em estado de superposição e terminando com o observador. Um contador Geiger, por exemplo, completamente isolado do resto do mundo, faz contato com um sistema quântico, digamos, um átomo simultaneamente em duas caixas. O contador Geiger é programado para disparar se o átomo estiver na caixa de baixo e permanecer inerte se o átomo estiver na caixa de cima. Von Neumann mostrou que o contador Geiger isolado, um objeto físico governado pela mecânica quântica, se *emaranharia* com o átomo nas duas caixas. Ficaria, portanto, em estado de superposição com o átomo. Logo, estaria simultaneamente em estado disparado e não disparado. (Vimos essa situação no caso do gato de Schrödinger.)

Caso um segundo dispositivo, também isolado, entre em contato com o contador Geiger – por exemplo, um instrumento eletrônico que indique se o contador disparou ou não –, ele adere à função de onda do estado de superposição, indicando ambas as situações simultaneamente. Essa assim chamada “cadeia de Von Neumann” pode continuar indefinidamente. Von Neumann mostrou que *nenhum* sistema físico, obedecendo às leis da física (isto é, da teoria quântica), poderia fazer colapsar uma função de onda em estado de superposição para produzir um resultado particular. No entanto, sabemos que o observador consciente na ponta da cadeia de Von Neumann sempre vê um resultado *particular*, um contador Geiger acionado ou não acionado, não uma superposição. Von Neumann mostrou que para todos os propósitos práticos a função de onda podia ser *considerada* colapsada em qualquer estágio macroscópico da cadeia de medição em que uma demonstração de interferência

se torne essencialmente impossível. Mesmo assim, ele concluiu que, estritamente falando, o colapso ocorre apenas no “*Ich*”, a mesma palavra que Freud usou para o Ego, a mente consciente.

Poucos anos depois Schrödinger contou sua história do gato para ilustrar o “absurdo” da sua própria teoria quântica. Sua história baseava-se essencialmente na conclusão de Von Neumann de que em princípio a teoria quântica necessitava de uma observação consciente, uma consciência, para fazer colapsar um estado de superposição. Poderia ser realmente assim?

Necessitamos de um observador consciente?

Será que um observador consciente é *necessário* para colapsar uma função de onda? Pode-se defender uma resposta “sim” ou “não” a essa pergunta. Tanto “colapsar” quanto “consciência” admitem um amplo espectro de significados. Para a história do gato de Schrödinger, podemos, com a interpretação de Copenhague, considerar que a função de onda do contador Geiger macroscópico colapsa para o estado acionado ou não acionado logo que o átomo o encontra. O gato se tornaria então rapidamente vivo ou morto, jamais entrando em estado de superposição. Por outro lado, como o contador Geiger e o resto da “engenhoca infernal” de Schrödinger estavam isolados do ambiente, talvez o gato simultaneamente vivo e morto *não* tivesse se tornado vivo ou morto até o observador ficar consciente de seu estado como *ou* vivo *ou* morto.

Esse último caso fica complicado. “Ficar consciente” pode significar ver o gato e tomar plena consciência de que o gato de Schrödinger está, digamos, morto. Por outro lado, a “observação consciente” do estado do gato poderia consistir em ver um facho de luz passar pelos furos na caixa, um facho de luz que não passaria se o gato estivesse de pé. (Será o *gato* um observador consciente? Para esse argumento, considere um gato robô, que cai se o contador Geiger é acionado.)

Um observador que conhecesse o significado do facho de luz teria observado conscientemente o gato como estando morto. No entanto, e se o observador estivesse meramente consciente de um facho de luz sem que este tivesse nenhum significado particular? Ou se o observador, atingido pelo facho, não tomasse absolutamente nenhuma consciência dele? Mesmo assim, esse observador ficaria emaranhado com aqueles fótons e portanto emaranhado com o gato. Se *esse* emaranhamento com um observador consciente constitui colapso, ampliamos enormemente o significado de “consciência”.

Enfatizamos que essa questão do colapso da função de onda surge a partir da *teoria* quântica. “Colapso” e “função de onda” são termos da teoria. O enigma quântico emerge diretamente a partir do *experimento* quântico, mediante a livre escolha do experimentador. O enigma surge sem qualquer necessidade de falar em “colapso” ou “função de onda”.

Senso de consciência versus emaranhamento

Consideremos mais uma vez um átomo num par de caixas. Digamos que as caixas sejam transparentes à luz. Se o átomo estivesse na caixa de cima, um fóton enviado através dela ricochetearia no átomo e desviaria tomando uma nova direção. Se o átomo estivesse na caixa de baixo, o fóton passaria direto. Com o átomo em estado de superposição em ambas as caixas, o fóton se emaranha com o átomo, juntando-se ao estado de superposição. Ele faz ambas as coisas: ricocheteia e passa direto. Um contador Geiger *isolado* no caminho da trajetória direta se emaranharia com a função de onda fóton-átomo e ao mesmo tempo dispararia e não dispararia.

Agora, porém, suponha que o contador Geiger, atingido pelo fóton, esteja sobre uma mesa apoiada no chão. O contador *não* isolado interage com a mesa (pois seus átomos ricocheteiam contra os átomos da mesa). Logo, ele está *emaranhado* com a mesa, e portanto com o resto do mundo, o que inclui pessoas. O átomo, emaranhado com o fóton, emaranhado com o contador, está agora emaranhado com observadores conscientes. Se ninguém olhar o contador Geiger (ou souber o que significa o seu acionamento), ninguém *saberá* em que caixa o átomo está.

Será que esse emaranhamento do átomo com o resto do mundo, incluindo observadores conscientes, colapsa o átomo inteiramente numa caixa única? Ou o colapso numa caixa única requer um *senso de consciência* de em qual caixa o átomo está mediante uma efetiva olhada no contador Geiger? Como poderíamos saber? Estritamente falando, a menos que invoquemos algo além da nossa atual teoria quântica, o átomo talvez esteja em ambas as caixas, e o contador Geiger ao mesmo tempo acionado e não acionado. (No capítulo 13 falamos do experimento proposto com observadores no espaço para testar isso.)

O resto do mundo se *emaranha* instantaneamente com nosso fóton tão logo ele atinja o contador Geiger *não* isolado. De acordo com a teoria quântica, o emaranhamento se propaga infinitamente depressa. Mas, para que uma pessoa distante se torne *consciente* da condição do contador, teria de se comunicar por algum meio *físico*, que não poderia exceder a velocidade da luz.

Vimos o emaranhamento viajando mais depressa que a luz, infinitamente depressa, presumivelmente, nos experimentos de Bell. *Imediatamente* ao se observar a polarização de um fóton gêmeo, ocorre a polarização do seu gêmeo – isso é o emaranhamento. Mas só quando os dois observadores tomam consciência dos resultados um do outro podem saber se os resultados combinam ou não. Um fóton "aprende" o comportamento do gêmeo instantaneamente, mas Alice e Bob podem se tornar conscientes dos resultados um do outro apenas com uma rapidez limitada pela velocidade da luz.

A figura 17.1, uma tirinha da revista *Physics Today* de maio de 2000, é relevante de algumas maneiras. (Quando o enigma quântico aparece em publicações de física, em vez de supostamente resolver-se a questão, ele com frequência é tratado com humor.) Chris, estando emaranhada com Eric e o resto do mundo, obviamente não entraria numa "superposição de todos os estados possíveis" quando Eric olhar para o outro lado. Afinal, um átomo que você encontrou numa caixa particular não entraria em superposição em ambas as caixas quando você olhasse para o outro lado.

FIGURA 17.1 Desenho de Nick Kim, 2000. © Instituto Americano de Física.

Consciência e redução

Com a consciência encontrada no experimento quântico, ou mesmo apenas surgindo na teoria quântica, podemos ver um problema no reducionismo. A perspectiva reducionista busca reduzir a explicação de um sistema complexo à sua ciência subjacente. Por exemplo, podem-se buscar explicações de fenômenos psicológicos em termos biológicos. Fenômenos biológicos podem ser vistos em última instância como químicos. E nenhum químico duvida de que fenômenos químicos são fundamentalmente as interações de átomos obedecendo à física quântica. A física, em si, ao que tudo indica repousa firmemente em terreno empírico primitivo.

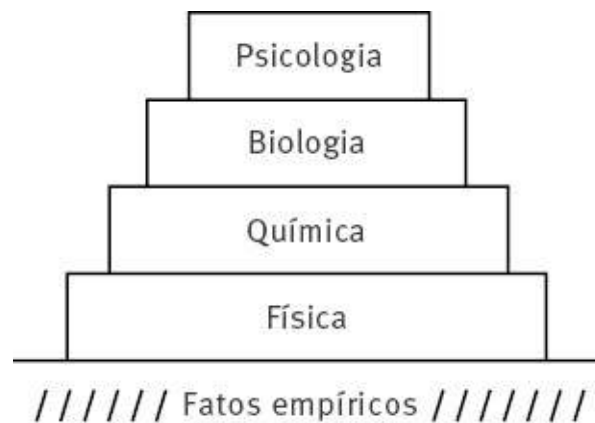
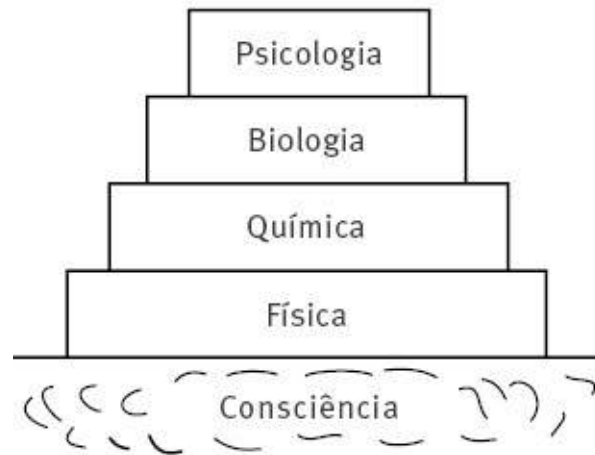



FIGURA 17.2 Hierarquia da explicação científica revisitada.

No capítulo 3 representamos essa visão com a pirâmide reducionista. Essa visão do terreno empírico primitivo sobre o qual se assenta a física é questionada pela mecânica quântica, onde, em última instância, a física se assenta sobre a observação. A observação, de algum modo, envolve consciência, *o que quer que ela seja*. Portanto, acrescentamos uma consciência um tanto nebulosa na base da nossa pirâmide reducionista na figura 17.2. Para todos os propósitos práticos, a ciência será sempre hierárquica, com cada nível da hierarquia necessitando de seu próprio conjunto de conceitos. Apesar disso, essa nova perspectiva da redução pode mudar o modo como percebemos o empreendimento científico.

O argumento do robô

O argumento de um robô mecânico é muitas vezes apresentado para negar qualquer envolvimento com a consciência. Eis como o argumento funciona: não precisamos de um observador *consciente* para fazer colapsar uma função de onda, porque um robô *não* consciente pode fazer a mesma coisa. Conjuntos de pares de caixas preparados como foi descrito no capítulo 7 são apresentados ao robô. Ele é programado para fazer ou um experimento "qual caixa?" ou um experimento de interferência com cada conjunto e imprimir um relatório de seus resultados. Esse relatório seria indistinguível de um apresentado por um experimentador consciente. Como não houve consciência envolvida nos experimentos, não existe nenhum enigma envolvendo consciência.

Eis por que esse argumento não funciona. O relatório impresso pelo robô indica que com certos conjuntos ele fez um experimento "qual caixa?", estabelecendo que *esses* conjuntos continham objetos totalmente numa caixa única. Com outros conjuntos, fez um experimento de interferência, estabelecendo que *aqueles* conjuntos continham objetos distribuídos em ambas as caixas. O relatório impresso do robô diz que os diferentes pares de caixas de fato *continham* objetos com esse tipo de diferença.

Um problema: como foi que o robô "decidiu" fazer o experimento *apropriado* com cada conjunto de pares? Se ele fizesse um experimento de interferência com objetos que de fato estavam totalmente numa caixa só, não obteria nenhum padrão de interferência, apenas uma distribuição uniforme. Isso *nunca* aconteceu. E o que ele teria dito no relatório se tivesse feito um experimento "qual caixa?" com objetos distribuídos nas duas caixas? Um objeto parcial *nunca* é informado.

Você investiga a escolha inexplicavelmente sempre acertada feita pelo robô no experimento. Descobre que ele usou um método de escolha tão eficaz quanto

qualquer outro para um robô mecânico: jogar cara ou coroa. Cara, ele fazia o experimento “qual caixa?”; coroa, o experimento de interferência. As escolhas apropriadas do robô surgiram do fato de o resultado do lançamento da moeda estar presumivelmente ligado com o que havia efetivamente dentro de um conjunto específico de pares de caixas. Você acha a conexão inexplicável, misteriosa.

Continuando sua investigação, você substitui o cara ou coroa do robô pelo método de decisão que você tem *certeza* que não está conectado com o que havia efetivamente num conjunto particular de caixas: *a sua própria livre escolha feita conscientemente*. Agora você aperta um botão dizendo ao robô qual experimento fazer com cada conjunto de pares de caixas. E descobre qual por sua livre escolha pode provar *ou* que os objetos estão concentrados numa única caixa *ou* que estão distribuídos em ambas as caixas, *qualquer uma* das duas coisas contraditórias. Agora você é confrontado com o enigma quântico, e a consciência é encontrada. O argumento do robô negando o encontro com a consciência não funciona.

A refutação do argumento do robô de fato requer aceitar nossa percepção consciente de que *podemos* fazer livres escolhas, que nossas escolhas *podem*, ao menos em parte, ser independentes do que existe no mundo físico exterior. A alternativa é que sejamos robôs num mundo totalmente determinista.

A única evidência objetiva para a consciência

Por "evidência objetiva" entendemos evidência de terceira pessoa que pode ser mostrada essencialmente para qualquer um. Evidência objetiva, nesse sentido, é a exigência normal para estabelecer uma teoria científica. Cada um de nós *sabe* que somos conscientes; essa é uma evidência de primeira pessoa para a consciência. Os outros informam que são conscientes; é evidência de segunda pessoa. Sem evidência de terceira pessoa, a evidência objetiva de que a própria consciência pode envolver diretamente algo fisicamente observável, sua própria existência é passível de ser negada. E às vezes é negada.

Alguns argumentam que "consciência" nada mais é que um nome para o comportamento eletroquímico da vasta reunião de células nervosas e moléculas associadas em nosso cérebro. Será que é possível mostrar algum papel direto da consciência além dos aspectos eletroquímicos confinados dentro de nosso corpo?

O que poderia se qualificar como evidência objetiva para a consciência envolvendo diretamente o físico? O experimento da dupla fenda, ou a versão com pares de caixas, parece *quase* se qualificar. Um ponto fraco é que a evidência é *circunstancial* em vez de *direta*. Ou seja, um fato (o padrão de interferência depende do espaçamento entre as caixas) é usado para estabelecer um segundo fato (o objeto estava em ambas as caixas).

A evidência circunstancial pode ser convincente além de uma dúvida razoável. Pode, por exemplo, assegurar legalmente uma condenação. Mas a lógica da evidência circunstancial pode ser tortuosa. Portanto, no espírito da nossa história em Eug Ahne Poc, primeiro apresentamos um exemplo, que *não existe* realmente, mas que mostraria evidência *direta* para a consciência. Sua evidência *direta* é fácil de analisar, e sua *analogia* com nosso experimento quântico coloca a evidência *circunstancial* mais claramente diante de nós. Eis nossa história:

Apresentam a você um conjunto de pares de caixas. Optando por abrir caixas do par uma de cada vez, você invariavelmente descobre que uma das caixas contém uma bolinha de gude e a outra está vazia. A bolinha está aleatoriamente na primeira ou na segunda caixa que você abre, e a outra caixa do par está sempre vazia. Por outro lado, se você optar por abrir as caixas de cada par mais ou menos ao mesmo tempo, sempre encontrará meia bolinha em cada caixa.

Você e a equipe de especialistas que contrata com seu orçamento ilimitado buscam alguma evidência de que o processo físico de abrir os pares de caixas possa ter algum efeito na condição da bolinha. Você estabelece, além de qualquer dúvida razoável, que não existe esse efeito físico.

É claro que essa demonstração *não pode* ser feita. Mas, *se* pudesse, você teria pouca alternativa a não ser aceitá-la como evidência objetiva de que a *escolha consciente* da técnica de abrir as caixas pode afetar a situação física. Essa seria uma evidência *objetiva*, de terceira pessoa (mas não uma prova), de que a consciência existe como entidade além de seus correlatos neurais.

O experimento quântico arquetípico, o experimento das duas fendas ou o experimento dos nossos pares de caixas, chega perto dessa demonstração. Nenhum efeito físico de abrir as caixas do par pode ser encontrado. Sua escolha consciente de qual experimento fazer ("qual caixa?" ou de interferência) pode aparentemente criar *uma das duas* situações físicas contraditórias nos pares de caixas. Como a demonstração pode ser mostrada para qualquer um, o experimento quântico é uma evidência objetiva.

Embora o experimento quântico deva envolver interferência e seja portanto, na melhor das hipóteses, evidência *circunstancial*, é a única evidência *objetiva* para a consciência que temos. Evidência, é claro, não é prova. O experimento quântico é a pegada do suspeito na cena do crime que *sugere* um culpado.

SERÁ QUE O EXPERIMENTO quântico realmente mostra a consciência estendendo-se para fora e fazendo algo físico? Em momentos sérios como físicos, não podemos

acreditar nisso nem parcialmente. Mas Eugene Wigner, um dos responsáveis pelo desenvolvimento da teoria quântica e laureado com o Nobel, especulou:

> O respaldo [para] a existência de uma influência da consciência sobre o mundo físico baseia-se na observação de que não sabemos de nenhum fenômeno no qual um sujeito seja influenciado por outro sem exercer nenhuma influência sobre ele. Isso parece convincente para este autor. É verdade que, nas condições usuais da física ou biologia experimental, a influência de qualquer consciência é certamente muito pequena. “Não precisamos da premissa de que haja algum efeito desses.” É bom lembrar, porém, que o mesmo pode ser dito da relação da luz com objetos mecânicos … É improvável que o [pequeno] efeito tivesse sido detectado se as considerações teóricas não sugerissem sua existência …

Esse tipo de especulação pode enfurecer alguns físicos. Mas pelo menos você conhece os fatos experimentais indiscutíveis nos quais se baseia a doida especulação de Wigner.

Posição é especial

Por que não podemos *ver* um objeto simultaneamente em duas caixas? A teoria quântica não fornece uma resposta. Estritamente falando, um objeto totalmente numa caixa A *também* pode ser considerado como estando num "estado de superposição". Ele está numa superposição (ou soma) do estado {na caixa A + na caixa B} mais o estado {na caixa A – na caixa B}. Tudo isso simplesmente resulta em {na caixa A}. Da mesma maneira, o estado do gato vivo é uma superposição do estado {vivo + morto} mais o estado {vivo – morto}. O fator ausente, 2, é explicado pela matemática real da teoria quântica.

Todos esses estados têm status equivalente no que concerne à teoria quântica. Por que, então, sempre vemos as coisas em certos tipos de estados – estados característicos de uma posição específica? Na verdade nunca vemos os estados esquisitos correspondentes a coisas que estejam simultaneamente em posições diferentes. (O gato simultaneamente vivo e morto de Schrödinger é um estado esquisito desses porque alguns átomos num gato vivo devem estar em posições diferentes dos átomos num gato morto para distinguir o estado vivo do estado morto.)

Para nosso objeto num par de caixas inferimos que ele estava simultaneamente nas duas fazendo um experimento de interferência. Mas nossas *experiências* reais no experimento de interferência foram as *posições* dos objetos nos máximos específicos de um padrão de interferência.

Pode-se argumentar que a razão de observarmos apenas estados caracterizados por posições exclusivas é que nós, humanos, somos seres capazes de vivenciar *apenas* uma posição (e tempo). Velocidade, por exemplo, é posição em dois instantes diferentes. Quando vemos coisas com nossos olhos, é por causa da luz em posições específicas na nossa retina. Sentimos por tato a posição de algo em nossa pele; ouvimos por meio da mudança de posição dos nossos

tímpanos; sentimos o cheiro pelos efeitos das posições de certo receptor em nosso nariz. Construímos portanto nossos instrumentos de medida de modo a exibir seus resultados em termos de posição – caracteristicamente, um ponteiro ou sinal luminoso numa tela. Nada na teoria quântica força essa situação. Nós, humanos, parecemos construídos dessa maneira especial.

É concebível que outros seres pudessem vivenciar a realidade de maneira diferente? Poderiam vivenciar diretamente os estados de superposição cuja existência nós apenas inferimos? Para eles, um átomo simultaneamente em duas caixas, ou o gato de Schrödinger simultaneamente vivo e morto, seria “natural”. Essa é, afinal, a maneira quântica, presumivelmente a maneira da natureza. Eles, portanto, não vivenciariam nenhum problema de medição, nenhum enigma quântico.

Dois enigmas

Na realidade podemos ver dois problemas de medição, dois enigmas. Focalizamos a realidade criada pelo observador: a observação fazendo, digamos, o átomo observado aparecer totalmente numa caixa única, ou que o gato de Schrödinger estivesse ou vivo ou morto. (O gracejo de Einstein, ao dizer que acreditava que a Lua estava realmente lá mesmo que ninguém estivesse olhando, referia-se a esse enigma.) Um enigma menos perturbador é a aleatoriedade da natureza. Como pode o átomo aparecer *aleatoriamente*, digamos, na caixa A e não na caixa B? Como o gato chega *aleatoriamente* a estar, digamos, no estado vivo? (O gracejo de Einstein de que Deus não joga dados referia-se a esse enigma.)

COM A INTERPRETAÇÃO dos muitos mundos da mecânica quântica sugerida por Everett, escolhemos todos os experimentos possíveis e vemos todos os resultados possíveis. Segundo essa concepção, "você" num mundo *particular* só é perturbado pelos dois enigmas porque não percebe que a cada observação, a cada decisão, se divide e existe simultaneamente numa profusão de mundos diferentes. Do ponto de vista everettiano, o "você" *completo* não deveria vivenciar nenhum enigma.

Vamos comparar os dois enigmas usando um pouquinho de fantasia (inspirada numa parábola de Roland Omnès). No plano mais elevado em que habitam, os everettianos vivenciam alegremente a profusão de realidades simultâneas dadas pela teoria quântica. Nenhum enigma os perturba. Um jovem everettiano, enviado aqui para baixo para explorar o planeta Terra, fica chocado ao descobrir suas múltiplas realidades simultâneas colapsarem numa realidade única (como uma função de onda colapsando para estar inteiramente numa só caixa). Sua curiosidade o leva a descidas repetidas. Cada vez ele vê suas

realidades colapsarem aleatoriamente em uma das muitas que estava acostumado a perceber simultaneamente no seu plano superior. Estarrecido com esse colapso, algo não explicável dentro da teoria quântica que ele compreendia tão bem, reporta um enigma: “Aqui embaixo na Terra, a natureza seleciona aleatoriamente uma realidade única.”

Nosso everettiano tinha um jeito favorito de olhar as múltiplas realidades que podia vivenciar (parecido com a nossa escolha de qual experimento fazer com os pares de caixas). Ele compreendia, porém, que essa escolha pessoal, ou o que os físicos chamam de “base”, era, de acordo com a teoria quântica, equivalente a qualquer outra. Numa descida particular à Terra, com um humor bastante incomum, nosso everettiano adota uma base diferente para suas realidade múltiplas. E vivencia um segundo estarrecimento. O colapso aleatório não era só para uma realidade específica, algo a que já tinha se acostumado, mas para uma realidade que era logicamente inconsistente com a apresentada pelo seu modo anterior de olhar. Teve que reportar um segundo enigma, bem mais perturbador: “Aqui embaixo, na Terra, a escolha consciente do modo de olhar pode criar realidades *inconsistentes.*”

Duas teorias quânticas da consciência

Teorias que abarquem mente e matéria e transcendam analogias devem ser grandes e ousadas. Invariavelmente, elas são controversas. A abordagem Penrose-Hameroff baseia-se na gravidade quântica, uma teoria que ainda está sendo desenvolvida, necessária para descrever buracos negros e o Big Bang, e da qual Roger Penrose é um dos principais colaboradores. A abordagem Penrose-Hameroff da consciência também envolve ideias de lógica matemática e da biologia neuronal.

O matemático Kurt Gödel provou que qualquer sistema lógico contém proposições cuja verdade não pode ser provada. Podemos, no entanto, por *insight* e intuição, saber a resposta. Penrose controversamente deduz daí que processos conscientes são não computáveis, isto é, que um computador não pode duplicá-los. Penrose nega desse modo a possibilidade de inteligência artificial forte, IA forte. Se for assim, a consciência, como o enigma quântico, vai além de qualquer coisa que a ciência *atual* possa explicar.

Penrose propõe um processo físico além da atual teoria quântica que faça colapsar rapidamente superposições macroscópicas em realidades. Tal processo faz com que um objeto macroscópico simultaneamente na caixa A *e* na caixa B fique rapidamente na caixa A *ou* na caixa B. E faz com que o gato de Schrödinger simultaneamente vivo *e* morto se torne rapidamente vivo *ou* morto. Em geral, ele transforma “e” em “ou”. O processo colapsa, ou “reduz”, a função de onda objetivamente, isto é, para todo mundo, mesmo sem um observador. Penrose chama o processo de “redução objetiva” e destaca como é apropriado o acrônimo OR (do inglês “*objective reduction*”), levando à ideia de uma situação onde há alternativa.[j]

Penrose especula que a OR ocorre espontaneamente sempre que duas geometrias espaço-temporais, e portanto efeitos gravitacionais, diferem

significativamente. Stuart Hameroff, um anestesista, que ressalta que desliga e volta a ligar regularmente a consciência, sugeriu como esse processo poderia ocorrer no cérebro. Dois estados de certas proteínas (especificamente tubulinas) que existem dentro dos neurônios podem exibir a OR de Penrose numa escala de tempo apropriada para funções neurais. Penrose e Hameroff alegam que estados de superposição e coerência quântica de longo alcance poderiam existir dentro do cérebro, mesmo que esteja em contato físico com o ambiente, e que a OR espontânea poderia regular as funções neurais.

Tais reduções objetivas, ORs, constituiriam “ocasiões de experiência”. Se emaranhada com objetos externos ao observador, uma OR no cérebro faria colapsar a função de onda dos objetos observados, e tudo emaranhado com eles.

As três bases da teoria Penrose-Hameroff – não computabilidade, envolvimento da gravidade quântica e participação das tubulinas – são, todas elas, controversas. E a teoria inteira tem sido ridicularizada como tendo o poder explicativo de “pozinho mágico nas sinapses”. No entanto, distintamente da maioria das outras teorias da consciência, quânticas ou não, ela propõe um mecanismo físico específico, alguns aspectos fundamentais dos quais são testáveis com a tecnologia de hoje. Tais testes estão a caminho, embora os resultados sejam discutíveis.

COM OUTRA TEORIA, Henry Stapp argumenta que a física *clássica nunca* pode explicar como a consciência pode ter algum efeito físico, mas que uma explicação surge naturalmente com a mecânica quântica. Vimos anteriormente como o livre-arbítrio era permitido na física clássica determinista somente pela exclusão da mente do domínio da física. Stapp observa que estender a física clássica ao cérebro/mente faria com que nossos pensamentos fossem controlados “de baixo para cima” pelo movimento determinista de partículas e campos. A física clássica não permite nenhum mecanismo para uma influência consciente “de cima para baixo”.

Stapp parte da formulação de Von Neumann da interpretação de Copenhague. Von Neumann, recordemos, mostrou que, ao observar um objeto microscópico em estado de superposição, toda a cadeia de medição – a partir, digamos, do átomo para o contador Geiger, para o olho humano olhando para o contador, para as sinapses assim emaranhadas no cérebro do observador – deve, estritamente falando, ser considerada parte de um grande estado de superposição. Apenas a consciência, algo além da equação de Schrödinger e além da física atual, pode, segundo Von Neumann, fazer colapsar uma função de onda.

Stapp postula duas realidades, uma física e uma mental. A realidade física inclui o cérebro, talvez num estado particular de superposição quântica. A realidade mental inclui a consciência de alguém e, em particular, suas intenções. Essa realidade mental pode atuar intencionalmente sobre o cérebro físico para escolher um estado de superposição *particular*, que então colapsa numa situação efetivamente existente. Nessa teoria, a consciência não "se estende" diretamente para o mundo externo, mas essa escolha mental mesmo assim determina, em parte, o caráter do mundo físico externo ao corpo. Determina, por exemplo, se um objeto estava totalmente numa caixa só do seu par ou simultaneamente em ambas. O aspecto aleatório final da escolha (em qual caixa específica, ou em que máximo de padrão de interferência o objeto é encontrado, por exemplo) é então feito pela natureza.

Como pode um cérebro grande e quente permanecer num estado quântico específico tempo suficiente para que as intenções de uma pessoa o influenciem? Seria de se esperar que movimentos térmicos aleatórios dos átomos no cérebro permitissem a existência de um estado quântico apenas por um tempo muito mais curto que o necessário para o processamento mental. Stapp responde a isso com o demonstrado "efeito Zenão quântico" (batizado a partir de um argumento de tipo Zenão: uma panela observada nunca ferve). Quando um átomo, ou qualquer sistema quântico, não observado decai de um estado superior para um inferior, esse decaimento começa muito devagar. Se o sistema for observado logo depois de o decaimento ter começado, quase certamente ele será encontrado no estado original. O decaimento recomeça então a partir do estado original. Se

o sistema for observado quase constantemente, quase nunca decai. Stapp aplica isso a intenções mentais de alguém “observando” o próprio cérebro e mantendo-o assim num dado estado quântico por tempo suficiente.

Stapp cita vários achados psicológicos como evidência para sua teoria. A teoria é, obviamente, controversa.

A interpretação psicológica da mecânica quântica

Embora a teoria quântica seja acintosamente contraintuitiva, funciona perfeitamente. Como a natureza não precisa se comportar de acordo com a nossa intuição, será que o problema da medição, o enigma quântico, está só em nossa cabeça? Talvez. Mas, se assim for, porque achamos a mecânica quântica tão difícil de aceitar? Por que os fatos observados produzem uma dissonância cognitiva tão forte, contrapondo nosso senso de livre-arbítrio a nossa crença num mundo fisicamente real existindo independentemente de ser observado?

Não basta meramente dizer que evoluímos num mundo onde a física clássica é uma boa aproximação. Evoluímos num mundo onde o Sol aparentemente se movia pelo céu e a Terra ficava parada. No entanto, a imagem copernicana, então contraintuitiva, foi prontamente aceita a despeito de nossa evolução. Também evoluímos num mundo onde as coisas se moviam lentamente em comparação com a velocidade da luz. A relatividade de Einstein pode ser grandemente contraintuitiva. Embora seja difícil para os estudantes de física aceitar de início que o tempo passa mais devagar num foguete em movimento, em pouco tempo se acostumam. Não encontramos "interpretações" da relatividade. Quanto mais profundamente se pensa na relatividade, *menos* estranha ela parece. Quanto mais profundamente se pensa na mecânica quântica, *mais* estranha ela parece.

O que há na organização do nosso cérebro que faz com que a mecânica quântica pareça tão esquisita? Com essa pergunta, a maioria dos físicos poderia atribuir o enigma quântico à psicologia. Nosso desconforto com a realidade física sendo criada por sua observação é uma mera limitação psicológica. Essa seria a interpretação psicológica da mecânica quântica. O enigma quântico não é mais, então, um problema para a física. É psicologia. Talvez seja algo que os psicólogos possam realmente abordar.

A mecânica quântica dá respaldo ao misticismo?

Às vezes insinua-se que sábios de religiões antigas intuíam aspectos da física contemporânea. O argumento pode ir adiante, alegando que a mecânica quântica fornece evidência para a validade desses ensinamentos místicos. Tal raciocínio não é convincente.

No entanto, embora a visão de mundo newtoniana seja às vezes vista como uma negação da *possibilidade* de tais noções, a mecânica quântica, falando de uma conectividade universal e envolvendo a observação na natureza da realidade, nega essa negação. No sentido mais geral, é possível pensar que os achados da física dão respaldo a certas ideias de sábios antigos. (Quando Bohr foi sagrado cavaleiro, pôs o símbolo *yin-yang* em seu brasão.)

A mecânica quântica nos conta coisas estranhas sobre nosso mundo, coisas que não compreendemos plenamente. A estranheza tem implicações além do que é geralmente considerado física. Os físicos poderiam portanto ser tolerantes quando não físicos incorporam ideias quânticas em seu próprio pensamento.

Nós, físicos, porém, ficamos perturbados, e às vezes constrangidos, pelo mau uso de ideias quânticas – por exemplo, como base para certas terapias médicas ou psicológicas (ou esquemas de investimentos!). Um teste que serve como critério para o mau uso é a apresentação dessas ideias com a implicação de que são *derivadas* da física quântica em vez de meramente analogias sugeridas por ela.

A mecânica quântica pode, no entanto, fornecer bons pontos de partida para histórias imaginativas. O teletransporte em *Jornada nas Estrelas* (“*Um para subir, Scotty*”) é uma extrapolação imaginativa mas aceitável da transmissão de influências quânticas em experimentos do tipo EPR. Com tais histórias tudo bem; fica claro, como ocorre em *Jornada nas Estrelas*, que são ficção. Infelizmente, nem sempre é assim.

Analogias

Se a consciência pode ou não ter impacto direto além do cérebro, a física quântica fornece algumas analogias convincentes. Embora analogias, é claro, não *provem* nada, elas podem estimular e guiar o pensamento. Analogias com a mecânica de Newton deflagraram o Iluminismo. Eis uma muito genérica de Niels Bohr:

> [O] aparente contraste entre o contínuo fluxo do pensamento associativo e a preservação da unidade da personalidade exibe uma analogia sugestiva com a relação entre a descrição ondulatória dos movimentos de partículas materiais, governados pelo princípio da superposição, e sua indestrutível individualidade.

Eis mais algumas sugeridas por outros:

Dualidade: Muitas vezes se argumenta que a existência da experiência consciente não pode ser deduzida das propriedades físicas do cérebro material. Dois processos qualitativamente diferentes parecem estar envolvidos. De modo similar, na teoria quântica, um evento real acontece não pela evolução da função de onda, mas pelo colapso da função de onda mediante a observação. Dois processos qualitativamente distintos parecem estar envolvidos.

Influências "não físicas": Se existe uma "mente" que seja diferente do cérebro físico, como ela se comunica com o cérebro? Esse mistério faz lembrar a conexão de dois objetos quanticamente emaranhados entre si – por meio daquilo que Einstein chamou de "ações fantasmagóricas" e Bohr de "influências".

Realidade criada pelo observador: O "ser é ser percebido" de Berkeley é a visão solipsista despropositada de toda a realidade sendo criada pela consciência. Mas ela lembra o que acontece com nosso objeto num par de caixas, ou com o gato de Schrödinger.

Pensamentos observadores: Se você pensa no conteúdo de um pensamento (sua posição), inevitavelmente altera aonde ele está indo (seu movimento). Por outro lado, se você pensa sobre aonde ele está indo, perde a nitidez do seu conteúdo. Analogamente, o princípio da incerteza mostra que se você observa a posição de um objeto, altera seu movimento. Por outro lado, se observa seu movimento, perde a nitidez de sua posição.

Processamento paralelo: As taxas de atividade neuronal são bilhões de vezes mais lentas que as dos computadores. Não obstante, com problemas complexos, os cérebros humanos podem superar os melhores computadores. O cérebro presumivelmente adquire sua potência trabalhando em muitos circuitos simultaneamente. É exatamente esse processamento paralelo maciço que os cientistas da computação tentam conseguir com computadores quânticos, cujos elementos estão simultaneamente em superposição de muitos estados.

As analogias entre consciência e mecânica quântica nos levam a esperar que o progresso nos fundamentos de um campo estimule o progresso no outro. Analogias podem até mesmo sugerir conexões testáveis entre ambos.

Parafenômenos

Parafenômenos são acontecimentos presumidos inexplicáveis no âmbito da ciência normal. Três exemplos envolvem a mente: a percepção extrassensorial (ESP, na sigla em inglês): adquirir informação por algum meio outro que não os sentidos normais; a precognição: discernir o que acontecerá no futuro; e a psicocinese: causar um efeito físico somente por ação mental.

Segundo pesquisas, a maioria dos americanos (e ingleses) acredita significativamente na realidade de tais fenômenos. Quando indagados com uma insinuação positiva, “Quem acha que é provável que exista ao menos um *pouquinho* de ESP?”, mais da metade dos alunos de grandes classes de física geral levanta a mão. (Nós dois responderíamos “*não* provável”.)

Como parafenômenos são frequentemente vinculados aos mistérios da mecânica quântica, faz-se aqui necessário um comentário. A conexão pode ser enganosa e às vezes fraudulenta. Tal ligação pode constranger os físicos, como atestamos pessoalmente. É um dos motivos para o fato de a discussão do enigma quântico ser evitada pelos físicos.

Há, porém, pesquisadores competentes alegando exibir tais fenômenos. A atitude de menosprezo, embora comum, pode revelar preconceito e parecer arrogante. É demonstravelmente ineficaz.

Citamos um exemplo recente de um relato sobre parafenômenos a ser levado a sério: em janeiro de 2011, o *New York Times* publicou um artigo intitulado “Espera-se que artigo de revista científica sobre ESP provoque indignação”. E provocou.

O artigo, aceito para publicação por uma das mais respeitadas revistas de psicologia, é de Daryl Bem, um distinto psicólogo e professor da Universidade Cornell. Bem reporta evidência experimental extensiva de ESP e precognição. Reconhecendo que os parafenômenos violam a visão de mundo científica

normal, ele recorda aos leitores: “Várias características de fenômenos quânticos [indiscutíveis] são elas mesmas incompatíveis com nossa concepção cotidiana de realidade física.”

Teoricamente espera-se que cientistas tenham mente aberta àquilo que veem, até mesmo aberta para o que é difícil de acreditar. Alguns cientistas, abertos *demais* para o que veem, têm se iludido com experimentos com parafenômenos. Mágicos, por outro lado, sendo peritos em iludir, não são enganados com facilidade. Eles têm se notabilizado por expor as falhas de alguns cientistas que alegaram evidência de parafenômenos. Observamos que o psicólogo Bem é um mágico notório e, portanto, menos passível de ser iludido.

Coisas difíceis de acreditar requerem evidência forte. Até o momento, ainda não existe evidência suficientemente forte para convencer os céticos da existência de parafenômenos.

Mas se – *se!* – algum desses fenômenos fosse demonstrado de forma convincente, demonstrado para cientistas (e mágicos) inicialmente céticos, saberíamos onde começar a procurar por uma explicação: as “ações fantasmagóricas” de Einstein. Indo um pouco adiante, a existência *demonstrada* de fenômenos quânticos expande a escala do que é concebível e assim aumenta a plausibilidade subjetiva de parafenômenos. (Estamos usando “subjetiva” no sentido bayesiano de probabilidade.) A extrema plausibilidade de parafenômenos dentro da teoria física atual significa que sua confirmação, *não importa quão fraco seja o efeito*, forçaria uma mudança radical em nossa visão de mundo.

NO PRÓXIMO CAPÍTULO consideramos as implicações do enigma quântico na maior escala de todas, o Universo inteiro.

---

[j] “*Or*” em português é “ou”. (N.T.)

18. Consciência e o cosmo quântico

> No princípio havia apenas probabilidades. O Universo podia vir a existir apenas se alguém o observasse. Não importa que os observadores tenham surgido vários bilhões de anos depois. O Universo existe porque somos conscientes dele.
>
> MARTIN REES

MARTIN REES, professor da Universidade de Cambridge e astrônomo real da Inglaterra, seguramente não pretendia que a citação acima fosse levada ao pé da letra. Tendo chegado até aqui neste livro, ao menos você sabe o que poderia estimular um comentário desses. É um grande passo desde as coisas pequenas para as quais a realidade criada pelo observador foi demonstrada até o Universo inteiro. A teoria quântica, porém, supostamente se aplica a tudo.

A teoria quântica presumivelmente abrange a maioria dos fenômenos da física (e da biologia). São apenas os mistérios apresentados pelo experimento quântico, e os mistérios apresentados pela cosmologia, que parecem exigir conceitos totalmente novos. Vimos eminentes cosmólogos quânticos – Wigner, Penrose e Linde – sugerindo que, num certo sentido, a consciência será encontrada na busca desses novos conceitos. Sentindo a mesma coisa, não podemos deixar nossa discussão sem um capítulo sobre o cosmo.

A TEORIA DA GRAVIDADE de Einstein, a "relatividade geral", parece funcionar perfeitamente para o Universo em grande escala; ela também prediz buracos negros e é necessária para se lidar com o Big Bang. No entanto, compreender buracos negros e o Big Bang também exige tratar de coisas de escala pequena. Portanto, requer teoria quântica. Exigir *tanto* relatividade geral *quanto* teoria quântica constitui um problema: a relatividade geral e a teoria quântica resistem a uma conexão.

O problema é que a teoria quântica assume um palco fixo de espaço e tempo, ou espaço-tempo, e então descreve o movimento da matéria nesse palco. Na relatividade geral, o palco se deforma quando a matéria diz ao espaço como se curvar e o espaço diz à matéria como se mover. Os teóricos de cordas e outros têm batalhado por décadas, e ainda batalham em vão, para acoplar essas duas descrições fundamentais da natureza de modo a produzir uma teoria quântica da gravidade.

Quando, vários anos atrás, falei a um colega teórico de cordas sobre meu interesse no enigma quântico, a resposta dele foi: “Bruce, não estamos prontos para isso.” Seu ponto era que a resolução daquilo que ele chamava de problema da medição quântica provavelmente requeria avanços ainda por vir na teoria da gravidade quântica – e, sentia ele, de modo nenhum estes envolveriam a consciência. Pode ser. Mas a cosmologia atual, nossa visão do Universo como um todo, apresenta o enigma quântico, um enigma que parece envolver a consciência, numa escala cada vez maior.

Buracos negros, energia escura e o Big Bang

Buracos negros

Quando uma estrela exaure o combustível nuclear que a mantém quente e expandida, colapsa sob sua própria atração gravitacional. Se sua massa excede um valor crítico, não há força que possa frear esse processo contínuo. A relatividade geral prediz seu colapso num ponto infinitesimal e massivo, uma “singularidade”. Os físicos esquivam-se de singularidades, e a teoria quântica substituiria a singularidade por uma massa extremamente compacta, mas de tamanho finito, de alguma maneira ainda não entendida.

A uma distância dessa massa compacta, que poderia ser de muitos quilômetros, dentro do assim chamado “horizonte de eventos”, a atração gravitacional é tão grande que nem mesmo a luz consegue escapar. Essa estrela colapsada, portanto, não emite luz. Logo, é negra. Qualquer coisa que se aventure dentro desse horizonte jamais pode sair. É um buraco negro.

Stephen Hawking mostrou que a mecânica quântica entra no quadro do buraco negro não só na singularidade mas também no horizonte. Efeitos quânticos devem fazer com que o horizonte do buraco negro emita o que agora é chamado de “radiação de Hawking”. Emitindo energia, qualquer buraco negro que não sugue massa das suas redondezas acabaria por se desvanecer em radiação, ou “evaporar” e desaparecer.

Embora a escala de tempo de evaporação para buracos negros grandes pudesse ser mais longa que a idade do Universo, a evaporação do buraco negro gerou um paradoxo. A teoria quântica insiste que a quantidade total de “informação” é sempre preservada. (Pode o conceito de “informação” ser independente do de “observação”?) Mas se a radiação de Hawking fosse radiação térmica aleatória, como se pensava inicialmente, toda a informação

contida em objetos caindo num buraco negro seria perdida quando o buraco negro evaporasse.

Estamos usando aqui uma noção abrangente de informação. Se, por exemplo, você joga seu diário no fogo, alguém pode, *em princípio*, recuperar sua informação analisando a luz, a fumaça e as cinzas. A aparente violação da teoria quântica representada pela perda de informação na evaporação do buraco negro levou Hawking a especular que a informação poderia, quando o buraco evaporasse, ser canalizada para um Universo paralelo.

Hawking recentemente concluiu que a radiação do buraco negro *não* é aleatória, que ela efetivamente carrega a informação contida nos objetos que caíram no buraco – da mesma forma que a fumaça carrega a informação do seu diário queimando. Não há necessidade de universos paralelos para receber a informação do buraco negro. Não obstante, alguns cosmólogos, por outras razões quânticas, sugerem que nosso Universo provavelmente não é o único, e até mesmo falam de evidência observacional disso, ainda que fraca.

OS BURACOS NEGROS RECEBERAM atenção da imprensa popular em 2009, quando um grupo enviou às Nações Unidas uma petição para impedir a entrada em funcionamento do Grande Colisor de Hádrons (LHC – Large Hadron Collider) perto de Genebra, na Suíça. O medo era que a máquina, provocando colisões de prótons em energias nunca antes conseguidas (14 TeV) criasse um buraco negro, que então devoraria todo o planeta. A possibilidade de criar buracos negros *minúsculos* havia sido de fato teoricamente postulada, mas presumivelmente eles evaporariam rapidamente, de modo inofensivo. Uma comissão de físicos foi efetivamente nomeada para estudar e responder a essa preocupação. O argumento convincente para a total ausência de perigo foi que nosso planeta vem sendo há muito bombardeado por raios cósmicos com energias da ordem das do LHC e muito mais altas. E ainda estamos aqui. O LHC a esta altura já foi ligado. E até aqui nada de buracos negros.

Energia escura

A cosmologia moderna baseia-se na teoria da relatividade *geral* de Einstein. Ela é “geral” no sentido de que estende sua anterior relatividade especial de maneira a incluir movimento acelerado e gravidade com a compreensão de que ambos são equivalentes. Por exemplo, se o cabo do elevador se rompesse, a aceleração para baixo que você experimentaria cancelaria sua vivência da gravidade.

Embora matematicamente complexa, a relatividade geral apresenta uma teoria conceitualmente bela, simples e direta. No entanto, na forma como Einstein a redigiu inicialmente em 1916, ela parecia ter um problema sério. Ela dizia que o Universo não podia ser estável. A atração gravitacional mútua das galáxias faria com que elas colapsassem em si mesmas. Einstein remendou sua teoria adicionando a “constante cosmológica”, uma força de repulsão que se contrapõe à atração gravitacional.

Em 1929, o astrônomo Edwin Hubble anunciou que o Universo *não* era estável – que estava, na verdade, se expandindo. Quanto mais distante uma galáxia, mais depressa ela se afastava. Sendo assim, em algum momento no passado tudo esteve aglutinado. Isso deu origem à ideia do Universo começando com uma grande explosão, o Big Bang. Portanto, presumivelmente as galáxias ainda estão se distanciando. Isso podia explicar por que as galáxias não caíam umas sobre as outras. Nenhuma força de repulsão, nenhuma constante cosmológica, era necessária.

Uma explosão não é exatamente a imagem correta. Na relatividade geral é o *próprio* espaço que se expande, não são as galáxias que estão se distanciando umas das outras num espaço fixo. Uma boa analogia são pedacinhos de papel colados num balão inflando. Assim, quanto mais distantes estejam uns dos outros, afastam-se cada vez mais depressa.

Quando Einstein percebeu que o Universo era de fato *não* estável, jogou fora sua constante cosmológica, classificando-a como “o maior erro da minha vida”. Se apenas tivesse acreditado em sua teoria original, muito mais bela, poderia ter predito um Universo em expansão (ou contração) mais de uma década antes da descoberta observacional.

A atração gravitacional mútua das galáxias deveria desacelerar a expansão, exatamente como a gravidade desacelera uma pedra jogada para cima enquanto ela sobe. A pedra sobe até certa altura e então cai de volta. De maneira similar, seria de se esperar que as galáxias desacelerassem, chegassem a alguma separação máxima e acabassem caindo de volta juntas num Big Crunch – uma extrema compressão.

Se você jogar uma pedra para cima com velocidade *suficiente*, ela continuará espaço afora para sempre. No entanto, ainda puxada pela atração gravitacional da Terra, reduzirá a velocidade continuamente. Da mesma forma, se o Big Bang tivesse sido violento o suficiente, o Universo se expandiria para sempre, embora num ritmo cada vez mais lento. Determinando a taxa de redução de velocidade de uma pedra lançada para o alto, pode-se saber se ela cairá de volta ou continuará no espaço para sempre. Descobrindo a taxa de redução de velocidade da expansão do Universo, podemos saber se devemos ou não esperar um Big Crunch.

NA VERDADE, reconheceu-se já há algumas décadas que as galáxias não constituem de fato toda a massa do Universo, nem mesmo a maior parte dele. Os movimentos das estrelas dentro das galáxias e outras evidências nos dizem que existe lá fora um tipo de matéria além daquela da qual são feitas as estrelas, os planetas e nós. Ela exerce atração gravitacional mas não emite, absorve ou reflete luz. Portanto, não podemos vê-la. É a “matéria escura”. Ninguém sabe o que ela é, mas as pessoas construíram detectores para pesquisar os possíveis suspeitos. É a soma da matéria normal e da matéria escura que, supostamente, deveria desacelerar a expansão e determinar o destino final do Universo.

(Num recente programa da série *Nova*, da PBS, um astrônomo disse que não conseguia pensar numa pergunta mais fundamental para a humanidade que: “Qual é o destino final do Universo?” Talvez seja de fato uma questão premente. Mas faz lembrar uma história: numa palestra pública, um astrônomo concluiu: “Portanto, daqui a cerca de 5 bilhões de anos o Sol vai se expandir como uma gigante vermelha e incinerar os planetas internos, inclusive a Terra.” “Oh, não!”, gemeu um homem no fundo da plateia. “Mas, senhor, não vai acontecer antes de *5 bilhões de anos*”, o astrônomo o confortou. A resposta do homem, aliviado, foi: “Ah, graças a Deus! Achei que você tinha dito 5 *milhões* de anos.”)

NA DÉCADA PASSADA, astrônomos se propuseram a determinar o destino do Universo medindo a rapidez com que certas estrelas distantes em explosão – supernovas – estão recuando. Essas explosões específicas têm um brilho intrínseco característico, e portanto os astrônomos podem saber a que distância as estrelas estão analisando quanto parecem brilhar daqui. E quanto mais longe estão, mais tempo atrás a luz que agora recebemos deve ter partido delas. Reunindo tudo isso, puderam determinar a velocidade com que o Universo estava se expandindo em diferentes momentos no passado, e portanto determinar a taxa de desaceleração.

Surpresa! A expansão do Universo *não* está desacelerando. Está *acelerando*. Não só a atração gravitacional mútua das galáxias está sendo cancelada, como há uma força repulsora no espaço que é *maior* que a atração gravitacional. Com essa força deve vir uma energia.

Como massa e energia são equivalentes ($E = mc^2$), essa misteriosa energia repulsora tem uma massa distribuída no espaço. Na verdade, *a maior parte* do Universo é composta dessa misteriosa “energia escura”. O Universo parece ser constituído por 70% de energia escura e 25% de matéria escura. O material de que são feitas as estrelas, os planetas e nós parece somar meros 5% do Universo.

Embora ninguém saiba o que é a energia escura, num sentido formal ela traz de volta a constante cosmológica de Einstein, seu “maior erro”, para as equações

da relatividade geral. Palpites teóricos têm um misterioso jeito de acabarem se revelando certos.

Será concebível que a misteriosa energia escura envolva a conexão entre o Universo em grande escala e a consciência que o comentário de Rees citado no começo do capítulo parece implicar? Dificilmente. Mas citemos o teórico quântico Freeman Dyson, escrevendo mesmo antes que surgisse a ideia da energia escura:

> Não seria surpresa se se descobrisse que a origem e o destino da energia no Universo não podem ser completamente entendidos isolados dos fenômenos da vida e da consciência … É concebível … que a vida possa ter um papel maior a desempenhar do que temos imaginado. A vida pode ter conseguido contra todas as probabilidades moldar o Universo a seus propósitos. E o projeto do Universo inanimado pode não estar tão desvinculado das potencialidades da vida e da inteligência como os cientistas do século XX tendem a supor.

O Big Bang

Os astrônomos determinam a velocidade com que uma galáxia se afasta de nós pelo desvio para o vermelho da sua luz. Essa redução de frequência é semelhante ao "efeito Doppler", o ruído da sirene de uma ambulância que fica mais grave quando ela acabou de passar por nós. É na verdade a expansão do espaço esticando o comprimento de onda da luz.

Os astrônomos correlacionam o desvio para o vermelho de um objeto com sua distância de nós estudando os desvios para o vermelho de objetos cujo brilho absoluto, e portanto sua distância de nós, é conhecido. Eles descobriram que os objetos mais distantes que podemos ver, galáxias afastando-se de nós a velocidades próximas às da luz, emitiram a luz que agora recebemos cerca de 13 bilhões de anos atrás. Essas galáxias provavelmente tinham a idade de cerca de 1 bilhão de anos quando a luz foi emitida. Isso sugere que o Big Bang ocorreu há cerca de 14 bilhões de anos.

Na época em que o Universo tinha a idade de 400 mil anos, havia esfriado o suficiente para permitir que elétrons e prótons difusores de luz se combinassem em átomos neutros, e pela primeira vez o Universo se tornou transparente à

radiação criada na bola de fogo inicial. Radiação e matéria no Universo jovem tornaram-se assim independentes uma da outra. Nesse ponto, a radiação, inicialmente numa frequência muito alta, estava em grande parte nas regiões ultravioleta e visível do espectro. Desde essa época, porém, o espaço se expandiu mais de mil vezes. O comprimento de onda daquela luz primordial estava agora esticado por aquele fator e viria a se tornar a "radiação cósmica de fundo" de três Kelvin, que agora está sendo irradiada sobre nós de todas as direções. Essa radiação de micro-ondas – descoberta acidentalmente em 1965 por físicos da AT&T Bell Laboratories que estavam estudando satélites de comunicação – é a evidência mais forte do Big Bang. Seus detalhes finos confirmam surpreendentemente propriedades calculadas para o Big Bang.

TEORIAS DE "INFLAÇÃO" especulam sobre a sequência *imediata* do Big Bang para explicar a extraordinária uniformidade do Universo nas escalas maiores, conforme evidenciado na distribuição das galáxias e da radiação cósmica de fundo. Segundo essas ideias, o espaço se expandiu quase instantaneamente, ou "inflacionou". Partes dele se distanciaram uma das outras numa taxa muito mais rápida do que a velocidade da luz. Isso não viola o princípio da relatividade de que o limite de velocidade é o da luz. Durante a inflação os objetos não se moviam no espaço mais depressa que a luz. Os objetos estavam se afastando porque o próprio espaço estava se expandindo. Começando a partir de algo muitíssimas vezes menor que um átomo, todo o Universo que observamos hoje presumivelmente inflacionou quase instantaneamente até o tamanho de um grande abacate.

UM APARTE: estamos obviamente falando de uma época a mais distante de observadores conscientes que podemos imaginar. Alguém poderia pensar que especialistas estudando essa física dificilmente se envolveriam com considerações sobre consciência. Não é necessariamente assim. Em um dos livros mais importantes sobre o assunto, *Particle Physics and Inflationary*

Cosmology (nada fácil de ler), o professor de física da Universidade de Stanford Andrei Linde escreve:

> Não acabará por se revelar, com o desenvolvimento adicional da ciência, que o estudo do Universo e o estudo da consciência estarão inseparavelmente ligados, e que o progresso definitivo em um campo será impossível sem o progresso no outro? … será o próximo passo importante o desenvolvimento de uma abordagem unificada para nosso mundo inteiro, inclusive o mundo da consciência?

Numa recente entrevista de vídeo (https://www.closertotruth.com/series/why-explore-cosmos-and-consciousness) Linde revela que sua editora sugeriu que retirasse do seu livro a referência à consciência porque "poderia perder o respeito de seus amigos". Linde disse a ela que se retirasse o trecho, "eu perderia meu próprio respeito".

APÓS O PERÍODO RIDICULAMENTE curto da inflação, a física parece ser capaz de explicar de forma detalhada o que aconteceu. No momento em que o Universo tinha um segundo de idade, os quarks se combinaram para formar prótons e nêutrons. Alguns minutos depois os prótons e nêutrons se juntaram para formar os núcleos dos átomos mais leves: hidrogênio, deutério (hidrogênio pesado, um próton e um nêutron), hélio e um pouquinho de lítio. A relativa abundância de hidrogênio e hélio nas estrelas mais velhas e nas nuvens de gás está de acordo com o que esperaríamos desse processo de criação.

Mas, durante essa fração de segundo antes que os nossos "familiares" quarks e elétrons passassem a existir, o Big Bang precisou de uma fina sintonia para produzir um Universo no qual pudéssemos viver. Uma sintonia fina impressionante! As teorias variam. Segundo uma delas, se as condições iniciais do Universo fossem escolhidas ao acaso, haveria apenas uma chance em 10^{120} (isto é, 1 com 120 zeros depois) de que o Universo permitisse vida. O cosmólogo e teórico da consciência Roger Penrose considera isso muito mais improvável: o *expoente* que ele sugere é 10^{123} (é difícil compreender o significado de um número tão grande). Por qualquer uma dessas estimativas, a chance de que um Universo capaz de ter vida como o nosso fosse criado é muito menor do que a

chance de pegar ao acaso um átomo *específico* entre todos os átomos do Universo.

Você consegue aceitar chances como essa como sendo coincidência? Parece mais provável que alguma coisa na física ainda não conhecida determine que o Universo *tinha* de começar do jeito que começou. Essa nova física provavelmente incluiria uma teoria quântica da gravidade. E poderia muito bem ser a tão procurada "teoria de tudo", unindo as quatro forças fundamentais da natureza numa teoria única. Todos os fenômenos físicos deveriam então ser explicáveis, pelo menos em princípio.

Sabemos qual será o aspecto da teoria de tudo. Será um conjunto de equações. Afinal, é isso o que os pesquisadores estão buscando. Poderia um conjunto de equações resolver o enigma quântico? Lembremos que o encontro da física com a consciência é visto diretamente no experimento quântico *neutro em termos de teoria*. Ele surge logicamente *antes* da *teoria* quântica, a partir de premissas que incluem o livre-arbítrio. Uma interpretação da teoria quântica, ou mesmo a sua dedução a partir de uma apresentação matemática mais geral, não poderia portanto resolver o enigma quântico sem envolver de algum modo nosso processo de decisão consciente.

Com uma perspectiva talvez similar sobre se a teoria de tudo explicaria o que vemos, Stephen Hawking coloca uma questão:

> Mesmo que haja apenas uma teoria unificada possível, ela é apenas um conjunto de regras e equações. O que é que ateia fogo nas equações e cria um Universo para que elas o descrevam? A abordagem habitual da ciência de construir um modelo matemático não pode responder a questões de por que deveria haver um Universo para o modelo descrever. Por que o Universo se dá a toda a trabalheira de existir?

Alguns sugerem que uma eventual teoria de tudo predirá tudo o que vemos, mesmo que não "explique". Deveríamos portanto buscar a teoria de tudo como meta definitiva e ficar satisfeitos com ela se a encontrarmos. Isso é tudo o que podemos esperar da ciência. É também a atitude que nós dois aceitamos – na maior parte do tempo. Mas nem sempre.

Críticos dessa atitude falam de um princípio antrópico. Começamos com a versão mais facilmente aceita, mas advertimos sobre ideias mais loucas à medida que vamos terminando o livro.

O princípio antrópico

Somente os núcleos mais leves foram criados no Big Bang. Os elementos mais pesados, carbono, oxigênio, ferro e todo o resto, foram criados dentro das estrelas, que se formaram muito mais tarde. Esses elementos além do hidrogênio e do hélio são liberados no espaço quando uma estrela massiva, tendo exaurido seu combustível nuclear, colapsa violentamente e então explode como supernova. Estrelas de gerações posteriores e seus planetas, inclusive nosso sistema solar, juntam esses detritos. Somos os remanescentes de estrelas que explodiram. Somos poeira de estrelas.

Além da sintonia extremamente fina do Big Bang que acabamos de mencionar, outro bocadinho de sorte parece estar envolvido na nossa criação estelar. Cálculos iniciais haviam mostrado que a formação de elementos pesados nas estrelas não podia chegar nem até o núcleo de carbono (seis prótons e seis nêutrons). O cosmólogo Fred Hoyle raciocinou que, como o carbono está de fato aqui, *tinha* de haver um meio de fazê-lo. E percebeu que um então inesperado estado quântico do núcleo de carbono com uma certa energia muito precisa podia permitir a produção estelar dos elementos chegando ao carbono, nitrogênio, oxigênio e mais longe. Hoyle sugeriu que o estado nuclear totalmente inesperado devia ser procurado. E foi *encontrado*.

Há outras coincidências: se as intensidades das forças eletromagnética e gravitacional fossem apenas *ligeiramente* diferentes do que são, ou se a intensidade da força nuclear fraca fosse *ligeiramente* maior ou *ligeiramente* menor, o Universo não seria hospitaleiro para a vida. Nenhuma física conhecida obriga essas coisas a dar tão certo.

Foram notadas muitas outras coincidências além das que mencionaremos aqui. Será que coisas funcionando com tanta perfeição, mas com tão pouca probabilidade, requerem explicação? Não necessariamente. Se simplesmente não

tivesse *acontecido* desse jeito, não estaríamos aqui para fazer a pergunta. Será que essa explicação basta? Tal raciocínio para trás, baseado no fato de que nós e nosso mundo existimos, é chamado “princípio antrópico”.

O princípio antrópico pode implicar que nosso Universo seja hospitaleiro à vida apenas por acaso. Por outro lado, alguns teorizam que um grande número de universos, mesmo um número infinito, veio a existir, cada um com suas condições iniciais aleatórias, até mesmo com suas próprias leis da física. Algumas teorias têm um grandioso “multiverso” constantemente criando universos novos. A vasta maioria desses universos provavelmente tem uma física não amigável à vida. Será que nossa existência improvável num Universo hospitaleiro raro necessita de explicação?

Eis uma analogia: considere quão improvável *você* é. Considere a probabilidade de você, alguém com seu exclusivo DNA, ser concebido. Milhões dos seus possíveis irmãos *não* foram concebidos. E agora volte algumas gerações. Com essas chances, você é essencialmente impossível. Será que o fato de você estar aqui necessita de explicação?

Com analogias como essa, alguns insistem que a ciência deve evitar o princípio antrópico. Esse princípio, alegam, não explica nada. E deve, portanto, ser rejeitado como “entulho desnecessário no repertório conceitual da ciência”. Pode-se argumentar que ele talvez tenha uma influência negativa, tolhendo o impulso para buscas mais profundas. Mas a linha de pensamento antrópica às vezes pode ser frutífera. Considere a predição de Hoyle do nível de energia para o carbono.

OPOSITORES AO PRINCÍPIO antrópico, ao que chamamos agora de “princípio antrópico fraco”, podem ter aversão ainda maior ao “princípio antrópico forte”. Segundo essa visão, o Universo é feito sob medida para nós. “Sob medida” implica a existência de um alfaiate, presumivelmente Deus. Isso pode ser algo a considerar. Mas dificilmente é um argumento para o design inteligente, como ocasionalmente é sugerido. Quem quer que “ateie fogo nas equações”

presumivelmente seria onipotente o bastante para fazê-lo de maneira apropriada logo no início e não precisaria fazer consertos a cada passo da evolução.

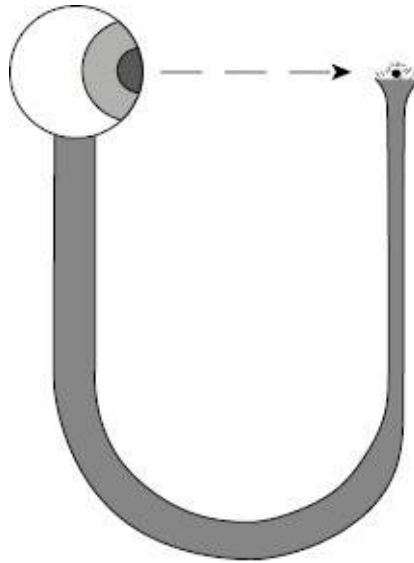



FIGURA 18.1 Será que olhar para trás “agora” dá realidade ao que aconteceu “naquele tempo”?

Uma versão diferente do princípio antrópico forte está implícita na citação de Rees no começo deste capítulo. *Nós* criamos o Universo. Segundo a teoria quântica a observação cria as propriedades de objetos microscópicos, e geralmente aceitamos que a teoria quântica se aplica universalmente. Se assim for, a realidade mais ampla também é criada pela nossa observação? *Indo até o fim*, *esta* versão do princípio antrópico forte afirma que o Universo é hospitaleiro a nós porque não poderíamos criar um Universo no qual não pudéssemos existir. Enquanto o princípio antrópico fraco envolve um raciocínio para trás no tempo, este princípio antrópico forte envolve uma forma de *ação* para trás no tempo.

Já na década de 1970, o cosmólogo quântico John Wheeler desenhou um olho observando uma evidência do Big Bang e perguntou: “Será que olhar para trás ‘agora’ dá realidade ao que aconteceu ‘naquele tempo’?” Seu desenho provocador não perdeu o impacto. Na recente conferência em homenagem a Wheeler em seu nonagésimo aniversário, a que eu (Fred) compareci, um importante orador introduziu seu discurso com o desenho de Wheeler.

As implicações antrópicas do desenho de Wheeler devem ter sido muita coisa até mesmo para Wheeler aceitar. Depois de fazer a pergunta acima, ele imediatamente acrescentou o comentário: “O olho poderia muito bem ser um pedaço de mica. Não precisa fazer parte de um ser inteligente.” É claro que esse pedaço de mica supostamente trazendo realidade ao Big Bang foi criado *depois* do Big Bang. (Para um físico, pode ser menos perturbador um pedaço de mica criar o Big Bang do que uma observação consciente.)

Esse princípio antrópico forte é provavelmente demais para alguém acreditar, ou mesmo apreender. Se nossa observação cria *tudo*, inclusive nós mesmos, estamos lidando com um conceito que é logicamente autorreferente – e portanto capaz de confundir a mente.

ACEITANDO ESSA CONFUSÃO, poderíamos perguntar: apesar de podermos criar apenas um Universo no qual possamos existir, este aqui que criamos é o único que *poderíamos* ter criado? Com uma escolha de observação ou um postulado diverso, o Universo seria diferente? Tem-se especulado loucamente que simplesmente postular uma teoria que não esteja em conflito com *nenhuma* observação anterior na verdade *cria* uma nova realidade.

Por exemplo, Hendrick Casimir, motivado pela descoberta do pósitron após sua predição aparentemente improvável, ponderou: “Às vezes quase parece que as teorias não são a descrição de uma realidade quase inacessível, mas que a assim chamada realidade é que é resultado da teoria.” Casimir também pode ter sido motivado por sua própria predição, posteriormente confirmada, de que a energia do vácuo da mecânica quântica no espaço levaria dois objetos macroscópicos a se atraírem mutuamente.

Só por divertimento: se houver algo na conjectura de Casimir, poderia a sugestão original de Einstein de uma constante cosmológica ter *causado* a aceleração do Universo? (Não é possível *provar* que tal especulação está errada. Portanto, não é uma especulação *científica*.) Embora levar uma ideia como essa

ao pé da letra seja seguramente ridículo, o enigma quântico pode motivar especulações escandalosas.

John Bell nos diz que uma maneira nova de ver as coisas provavelmente nos deixará estarrecidos. É difícil imaginar algo verdadeiramente estarrecedor que não excluamos de início como absurdo. A especulação ousada pode estar na ordem do dia, mas também estão a modéstia e a cautela. Uma especulação nada mais é que um palpite até que faça previsões testáveis e confirmadas.

Pensamentos finais

Apresentamos o enigma quântico que surge dos fatos concretos exibidos em experimentos quânticos incontestáveis. Não tivemos a presunção de resolver o enigma quântico. As questões que o enigma levanta são mais profundas que quaisquer respostas que pudéssemos propor seriamente.

A teoria quântica funciona perfeitamente; nenhuma previsão da teoria jamais se mostrou errada. É a teoria básica a toda a física, e portanto a toda a ciência. Um terço da nossa economia depende de produtos desenvolvidos com ela. Para todos os propósitos *práticos*, podemos estar completamente satisfeitos com a teoria quântica. Mas, se você levá-la a sério *além* dos propósitos práticos, verá que ela tem implicações estarrecedoras.

A teoria quântica nos diz que o encontro da física com a consciência, que é *demonstrado* para o pequeno, se aplica, em princípio, a tudo. E esse "tudo" pode incluir o Universo inteiro. Copérnico destronou a humanidade do centro cósmico. Será que a teoria quântica sugere que, de algum modo misterioso, *somos* um centro cósmico?

O encontro da física com a consciência tem dado dor de cabeça aos físicos desde a criação da teoria quântica, mais de oito décadas atrás. Muitos físicos, sem dúvida a maioria, desprezam a criação da realidade pela observação como tendo pouco significado além do limitado domínio da física de entidades microscópicas. Outros argumentam que a natureza está nos dizendo algo, e que deveríamos escutar. Nossos próprios sentimentos estão de acordo com os de Schrödinger:

> A urgência de achar uma saída para esse impasse não deveria ser frustrada pelo medo de incorrer na zombaria dos sábios racionalistas.

Quando especialistas discordam, você pode escolher um deles. Como o enigma quântico surge no experimento quântico mais simples, sua essência pode

ser plenamente apreendida com pouca formação técnica. Não especialistas podem portanto chegar a suas *próprias* conclusões. Esperamos que as suas, como as nossas, sejam tentativas.

> Há mais coisas entre o céu e a terra, Horácio, do que sonha a sua vã filosofia.
>
> SHAKESPEARE, *Hamlet*

Leituras sugeridas

Baggott, J. *The Quantum Story: A History in Forty Moments*. Nova York, Oxford University Press, 2011.

Uma excelente abordagem da turbulenta história da mecânica quântica por um autor que não só é tecnicamente perito na teoria como aprecia suas profundas implicações.

Bell, J.S. e A. Aspect. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Londres, Cambridge University Press, 2ª ed., 2004.

Coletânea de artigos de John Bell. A maioria deles é bastante técnica, mas mesmo esses têm partes que, com perspicácia, revelam os *insights* do principal teórico quântico da segunda metade do século XX.

Blackmore, S. *Consciousness: An Introduction*. Nova York, Oxford University Press, 2004.

Um apanhado geral abrangente da moderna literatura sobre consciência, desde os correlatos neurais da consciência, passando por psicologia teórica e experimental, até parafenômenos. São incluídas algumas menções à mecânica quântica.

Cline, B.L. *Men Who Made a New Physics*. Chicago, University of Chicago Press, 1987.

Essa história leve e bem escrita do desenvolvimento inicial da mecânica quântica enfatiza os dados biográficos e inclui muitos relatos divertidos. Como foi escrito nos anos 1960, evita qualquer discussão significativa sobre a conexão quântica com a consciência. (Um dos "homens" ["*men*"] do título é Marie Curie.)

Davies, P.C.W. e J.R. Brown. *The Ghost in the Atom*. Cambridge, Cambridge University Press, 1993.

As primeiras quarenta páginas dão uma descrição compacta e compreensível do "Estranho mundo do quantum". São seguidas por uma série de entrevistas da Rádio BBC 3 com eminentes físicos quânticos. Seus comentários extemporâneos nem sempre são prontamente compreensíveis, mas dão claramente o sabor do mistério que eles veem.

D'Espagnat, B. *On Physics and Philosophy*. Princeton, NJ, Princeton University Press, 2006.

Obra extensa com uma abordagem competente que se aprofunda nas questões da realidade e da consciência levantadas pela mecânica quântica. Sem jargão matemático, mas não é uma leitura fácil.

Elitzur, A., S. Dolev e N. Kolenda, eds. *Quo Vadis Quantum Mechanics?*. Berlim, Springer, 2005.

Uma coletânea de artigos e transcrições de discussões informais de eminentes pesquisadores, com ênfase nos aspectos paradoxais da mecânica quântica. Alguns dos artigos são altamente técnicos, mas aspectos de vários deles são bastante acessíveis e indicam como a física encontrou o que parece uma fronteira da disciplina.

Gilder, L. *The Age of Entanglement: When Quantum Physics Was Reborn*. Nova York, Vintage Press, 2009.

Conversas imaginárias entre os fundadores da teoria quântica, todas baseadas em fontes bem documentadas, e conversas reais com físicos em atividade recente. Leitura fácil e envolvente.

Griffiths, D.J. *Introduction to Quantum Mechanics*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1995.

Um texto sério para um curso de física quântica de nível sênior. As primeiras páginas, porém, apresentam opções de interpretação sem matemática. O paradoxo EPR, o teorema de Bell e o gato de Schrödinger são tratados num “Posfácio”. (A capa do livro retrata um gato vivo; ele está morto na contracapa.)

Hawking, S. e L. Mlodinow. *A Briefer History of Time*. Nova York, Random House, 2005.

Uma apresentação breve, fácil de ler mas competente da cosmologia, grande parte dela a partir do ponto de vista da mecânica quântica. Há substancial menção à metafísica e a Deus.

Holbrow, C.H., J.N. Loyd, e J.C. Amato. *Modern Introductory Physics*. Nova York, Springer, 1999.

Um excelente texto introdutório de física, com uma perspectiva verdadeiramente moderna, incluindo os tópicos de relatividade e mecânica quântica.

Kumar, M. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality*. W.W. Norton & Company, 2010.

Obra competente e escrita de maneira interessante sobre o “Debate” Einstein-Bohr. O teorema de Bell e a continuação do debate são apresentados mais brevemente.

Miller, K.R. *Finding Darwin’s God: A Scientist’s Search for Common Ground between God and Evolution*. Nova York, HarperCollins, 1999.

Uma convincente refutação do design inteligente que também argumenta que alegações arrogantes de alguns cientistas modernos de que a ciência refutou a existência de Deus têm promovido antipatia pela evolução, tanto darwiniana quanto cosmológica. A mecânica quântica desempenha um papel proeminente na abordagem de Miller.

Park, R.L. *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud*. Nova York, Oxford University Press, 2000.

Uma exposição breve e inteligentemente escrita de uma vasta gama de provedores de pseudociência que exploram o respeito que as pessoas têm pela ciência alegando que ela dá credencial a seus particulares absurdos.

Schrödinger, E. *What is Life? & Mind and Matter*, Londres, Cambridge University Press, 1967.

Uma coletânea mais antiga, porém muito influente, de ensaios de um fundador da teoria quântica, inclusive um intitulado “The physical basis of consciousness” (“A base física da consciência”).

Agradecimentos

Durante a preparação de nosso livro beneficiamo-nos enormemente das sugestões, críticas e correções que nos foram oferecidas por aqueles que leram capítulos enquanto estavam sendo preparados e revistos. Somos muito reconhecidos à ajuda de Leonard Anderson, Phyllis Arozena, Donald Coyne, Reay Dick, Carlos Figueroa, Freda Hedges, Nick Herbert, Alex Moraru, Andrew Neher e Topsy Smalley.

Agradecemos calorosamente a nosso ex-editor, Michael Penn, por seus perceptivos conselhos e pelo apoio, e a nossa atual editora, Phyllis Cohen, igualmente por seus perceptivos conselhos e contínuo apoio, e pelo estímulo a novos projetos. Somos gratos à editora de produção da primeira edição, Stephanie Attia, por suas valiosas sugestões. E agradecemos à editora de produção Amy Whitmer por sua eficiente ajuda na segunda edição.

O tempo todo, nossa agente Faith Hamlin nos deu conselhos cruciais e um incentivo caloroso. Apreciamos muito seu envolvimento em nosso livro.

Índice remissivo

As páginas em *itálico* indicam imagens.

absurdo da teoria quântica, 1-2, 3-4
Academia Prussiana de Ciência, 1
aceleração, 1-2
aceleradores de partículas, 1-2
ações fantasmagóricas, 1-2
    Bell e, 1-2
    Einstein e, 1-2, 3, 4, 5, 6-7
    teorema de Bell e, 1-2
    teoria quântica e, 1-2
    testes experimentais de, 1-2
Afonso X (rei de Castela), 1
aleatoriedade:
    da mecânica quântica, 1, 2, 3
    da natureza, 1, 2-3, 4
    das observações, 1-2
algas, 1
álgebra transcendental, 1
Alice e Bob, experimentos mentais, 1-2, 3-4, *5*, 6-7, 8-9, 10-11
Allen, Woody, 1

alquimia, 1
apertar o botão, experimento de, 1
aplicações médicas, 1, 2-3
aplicações tecnológicas da mecânica quântica, 1-2
    computadores quânticos, 1-2, 3, 4
    dispositivos de carga acoplada (CCDs), 1-2, *3*
    futuro das, 1-2
    lasers, 1-2, 3, 4
    pontos quânticos, 1
    tecnologia de IRM, 1, 2-3
    transistores, 1-2
Aquino, Tomás de, 1
arbitragem, modelagem de, 1
argônio, átomos de, *1*
Aristóteles, 1-2, 3, 4, 5
    filosofia de, 1-2
    Física, 1, 2
    Galileu e, 1-2, 3
    Metafísica, 1, 2
árvore, questão da, 1, 2-3
Aspect, Alain, 1, 2
astronomia, 1
    medieval, 1-2
    radiastronomia, 1
átomo(s), 1, 2-3

cargas elétricas do, 1-2, 3
de argônio, *1*
de carbono, 1
de hidrogênio, 1-2, 3, 4, 5, 6-7, *8*, 9-10
de impurezas, 1
disparados um de cada vez através de uma barreira móvel com duas fendas, *1*
distribuição através de uma única fenda estreita, *1*
em padrões de interferência, *1*
estado de superposição, 1-2
estado excitado do, 1
estrutura interna do, 1-2
função de onda do, 1-2, 3-4, 5-6, 7, *8*
microscópio de tunelamento com varredura, vistos com, 1, 2
não observados e observados, 1-2
polos norte e sul do, 1, 2
pudim de passas, modelo do, 1-2, *3*
ricochetear um fóton num átomo, *1*
Rutherford, modelo atômico de, *1*
átomos observados e não observados, 1-2
atrito, 1, 2
ausência de variáveis ocultas, teorema da, 1-2

bases de dados, busca em, 1
bayesiana, probabilidade, 1
behaviorista, psicologia, 1, 2-3

Bell, desigualdade de:
dedução da, 1-2, *3*, *4*, *5*, *6*
realidade física e, 1-2
violação da, 1-2, 3-4, 5, 6
Bell, John Stewart, *1*, 2, 3, 4-5, 6
ações fantasmagóricas e, 1-2
histórico de, 1-2
motivação de, 1-2, 3, 4
Weinberg e, 1
Bell, teorema de, 1, 2, 3
ações fantasmagóricas e, 1-2
testes experimentais do, 1-2, 3
Bem, Daryl, 1
Bennett, Bill, 1
benzeno, 1
benzol, 1
Berkeley, George, 1-2, 3
Big Bang, 1, 2, 3, 4
teoria quântica e, 1, 2, 3-4
Wheeler e, *1*, 2
Big Crunch, 1
biologia, fenômenos quânticos em, 1-2, 3, 4
biotecnologia, 1
Bohm, David, 1, 2, 3
Einstein e, 1

interpretação do enigma quântico, 1-2, 3

problema do observador, 1, 2

Bohr, Aage, 1

Bohr, Harald, 1

Bohr, Niels, 1, 2, 3, *4*, 5, *6*

"Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", 1-2

desenvolvimento do modelo orbital e, 1-2, 3, 4

Einstein e, 1-2, *3*, 4-5, 6

histórico, 1

interpretação de Copenhague e, 1-2, 3-4, 5, 6-7, 8-9

saltos quânticos e, 1-2

Schrödinger e, 1-2, 3

bola de bilhar, analogia da, 1, 2

bolinhas de gude, demonstrações com, 1-2,*3*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9*

consciência em, 1

estado de superposição em, 1

livre-arbítrio em, 1, 2-3

padrões de interferência em, 1-2

realidade física em, 1-2

bombas atômicas, 1

bombas inteligentes, 1

Born, Max, 1, 2

Bose-Einstein, condensado de, 1, 2

Bruno, Giordano, 1

bruxaria, 1

Buchwald, Jed, 1

buckminsterfulereno, 1

buracos negros, 1, 2, 3-4

evaporação de, 1-2

Business Week (revista), 1

c (velocidade da luz), 1-2, 3-4, 5-6, 7, 8

cálculo, 1

calor, 1

câmeras digitais, 1-2

campos elétricos, 1, *2*, 3, 4-5

oscilantes, 1-2, *3*

campos magnéticos, 1

“Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?” (Bohr, N.), 1-2

“Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?” (Einstein, Podolsky e Rosen), 1-2, *3*, 4, 5-6

canhão sobre a montanha, desenho de Newton, *1*

Capital, *O* (Marx), 1

capitalismo, 1

carboidratos, criação de, 1

carbono, átomos de, 1

cargas elétricas de átomos, 1-2

cargas negativas, 1, *2*

cargas positivas, 1, *2*

Carroll, Lewis, 1

casal na choupana, experimento do, 1-2, 3, 4
cascata de dois fótons, *1*
Casimir, Hendrick, 1-2
catástrofe do ultravioleta, 1-2
CCDs *ver* dispositivos de carga acoplada
cérebro:
    dualismo mente-cérebro, 1
    tecnologia de imagem cerebral, 1, 2
Cern *ver* Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear
cetros, 1
Chalmers, David, 1, 2, 3-4, 5-6, 7
charge do cão, sobre o experimento mental do gato na caixa, *1*
chips semicondutores, 1
cianeto de hidrogênio, 1
ciência confiável, 1-2
clássico, charge sobre aparato, *1*
Clauser, John, 1, 2-3, 4, 5, 6
coerência quântica, 1-2
    de longo alcance, 1
colapso da ondulatoriedade, 1-2
    em experimentos de dupla fenda, 1-2, 3-4, 5-6
    objetivamente, 1
    para estado de superposição, 1-2
    por observação, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8
colisões de partículas em altas energias, 1

cometas, 1, 2
Comitê de Atividade Antiamericanas, 1
complementaridade, 1-2
completude, da teoria quântica, 1-2
comprimentos de onda em órbita de elétrons, 1, *2*
Compton, Arthur, 1-2, 3, 4
computadores:
conscientes, 1-2
Deep Blue, 1
pessoais, 1
quânticos, 1-2, 3, 4
Comte, Auguste, 1
conectividade universal, 1, 2, 3, 4, 5-6
consciência:
como ilusão, 1, 2
computadores e, 1-2
continuum da, 1
cosmo quântico e, 1-2
definições de, 1-2
duas teorias quânticas da, 1-2
eletroquímica e, 1
em demonstrações com bolinhas de gude, 1
enigma quântico e, 1-2
estendendo-se para fora, 1, 2, 3
evidência objetiva da, 1-2

experimento mental do gato na caixa e, 1
experimentos dos pares de caixas e, 1-2
física clássica e, 1, 2
física e, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8
físicos e, 1-2
irrelevância da, 1
livre-arbítrio e, 1-2, 3, 4, 5, 6
luz interior da, 1
observação e, 1-2, 3-4, 5
problema difícil da, 1-2
problema do observador e, 1
realidade física e, 1
redução e, 1
robôs e, 1, 2-3
Wheeler e, 1-2
Conscious Mind, The (Chalmers), 1
Consciousness Explained (Dennett), 1-2
consenso, problema do, na ciência grega, 1
consequências sociais da mecânica quântica, 1
conservação da energia, 1, 2-3, 4
contadores Geiger:
em experimentos de dupla fenda, 1
estados de superposição e, 1-2
interpretação de Copenhague, 1-2, 3-4, 5
na dedução da desigualdade de Bell, 1

na interpretação de ondulatoriedade de Schrödinger, 1, *2*
no experimento do gato na caixa, 1-2, 3
observação por, 1, 2, 3-4, 5
continuum de consciência, 1
contradição lógica, 1, 2, 3, 4
Copenhague, interpretação de, 1, 2, 3, 4-5, *6*
aceitação da, e desconforto com, 1-2
Bohr, N., e, 1-2, 3-4, 5, 6-7, 8-9
complementaridade e, 1-2
do enigma quântico, 1
Einstein e, 1-2
experimentos dos pares de caixas e, 1-2, *3*, 4-5, 6
explicações do contador Geiger, 1-2, 3-4, 5
extrema, do enigma quântico, 1-2
Heisenberg, princípio da incerteza de, e, 1-2
interferência, padrões de, 1-2, 3, 4
interpretação de probabilidade da função de onda e, 1-2, 3
problema do observador e, 1
Schrödinger e, 1, 2
síntese da, 1-2
três pilares da, 1-2
versão ortodoxa da, 1, 2
versão pragmática da, 1, 2, 3-4
Copenhague extrema, interpretação de, do enigma quântico, 1-2
Copérnico, Nicolau, 1, 2, 3, 4

Igreja e, 1-2, 3, 4
cor, experimento mental sobre percepção da, 1
corda de violão, ressonância de, *1*
cores da luz, 1
corpuscular, teoria, 1
correlações:
de fótons, 1, 2, 3
realidade física de, 1-2
cosmo quântico e consciência, 1-2
cosmologia, 1-2, 3, 4, 5-6
constante cosmológica, 1-2, 3, 4
da teoria quântica, 1, 2, 3, 4-5, 6
cosmologia quântica, 1, 2, 3, 4-5, 6
Coulomb, lei de, 1-2
Cramer, John, 1
criação:
de carboidratos, 1
da história, 1
da história, em experimentos da dupla fenda, 1-2
pela observação, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9-10, 11-12
Crick, Francis, 1, 2-3

Darwin, Charles, 1, 2, 3
Davisson, Clinton, 1
Davy, Humphrey, 1

De Broglie, Louis, 1-2, *3*, 4

- “comprimento de onda de De Broglie” de uma partícula, 1-2, 3, 4, 5
- Einstein e, 1, 2
- prêmio Nobel de, 1

decoerência, 1, 2, 3

- enigma quântico e, 1-2

Deep Blue, computador IBM, 1

Dennett, Daniel, 1-2

descombinação, taxa de, para fótons gêmeos, 1-2

design inteligente, 1

desvio para o vermelho da luz, 1-2

detecção sensível de ondas gravitacionais, 1

determinação contrafactual, 1, 2, 3, 4

determinismo, 1-2, 3

- enigma do determinismo newtoniano, 1, 2-3
- livre-arbítrio e, 1, 2-3
- mundo supradeterminista, 1-2, 3
- propriedade determinística da teoria quântica, 1

Deus, 1, 2, 3-4, 5

- deístas e, 1
- design inteligente e, 1
- joga dados, 1, 2, 3, 4
- livre-arbítrio e, 1
- onipotência de, 1, 2
- pensamentos de, 1

Deus, adeptos de, 1
deutério, 1
diagnóstico por imagem, 1-2
dispositivos de carga acoplada (CCDs), 1-2, *3*
DNA, 1, 2
Doppler, efeito, 1
doutrina da perturbação física, 1
doutrina da perturbação semântica, 1
Dreams of a Final Theory (Weinberg), 1
dualidade, analogia da, 1
dualidade onda-partícula, 1-2, 3, 4-5
    no experimento da dupla fenda, 1
dupla fenda, experimentos de, 1-2, *3*, *4*, *5*
    átomos disparados um de cada vez através de uma barreira móvel de duas fendas, *1*
    colapso da ondulatoriedade nos, 1-2, 3-4, 5-6
    com luz, 1-2, *3*, *4*
    com padrões de interferência, 1-2, *3*
    contadores Geiger em, 1
    criação da história em, 1-2
    enigma quântico em, 1
    paradoxo onda-partícula em, 1
    pares de caixas, versão dos, 1-2, *3*
problema do observador e, 1
    versão “qual caixa?” de, 1-2, 3, 4, 5
DVDs, 1

Dylan, Bob, 1
Dyson, Freeman, 1

EEG *ver* eletroencefalografia,
efeito fotoelétrico, 1-2
Einstein, Albert, *1*
    ações fantasmagóricas e, 1-2, 3, 4, 5, 6-7
    Bohm e, 1
    Bohr, N. e, 1-2, *3*, 4-5, 6
    De Broglie e, 1, 2
    EPR e, 1-2, *3*, 4, 5-6
    escritório suíço de patentes, 1-2, 3
    gravidade e, 1
    hipótese do fóton e, 1-2, 3-4, 5, 6-7
    histórico de, 1-2
    interpretação de Copenhague e, 1-2
    noite com os autores, 1-2
    Planck e, 1
    prêmio Nobel de, 1
Einstein, Podolsky e Rosen, artigo (EPR), 1-2, *3*, 4, 5-6
Éléments de la philosophie de Newton (Voltaire), 1
eletrodo, 1-2
eletroencefalografia (EEG), 1
eletromagnética, força, 1-2
    elétrons e, 1, 2

prótons e, 1, 2
eletromagnética, radiação, 1, 2
eletromagnética, teoria ondulatória, 1, 2, 3
elétrons:
comprimentos de onda em torno da órbita dos, 1, *2*
condutores, 1
de valência, 1
energia de elétrons ejetados versus frequência da luz, *1*
força eletromagnética e, 1, 2
interferência de, 1-2
na fotossíntese, 1
na interpretação de ondulatoriedade de Schrödinger, 1-2
natureza ondulatória dos, 1, 2
radiação térmica e, 1-2, 3-4
razão giromagnética de, 1
Thompson, J.J., 1
elétrons condutores, 1
elétrons de valência, 1
eletroquímica, 1, 2, 3, 4-5, 6-7
emaranhamento, 1, 2, 3, 4-5
como observação, 1
da membrana de nitreto de silício, 1-2
pretendido, 1
versus senso de consciência, 1-2
emaranhamentos pretendidos, 1

emissão estimulada, 1
energia, 1-2
cinética, 1-2
colisões de partículas em altas energias, 1
conservação da, 1, 2-3, 4
de elétrons ejetados versus frequência da luz, *1*
escura, 1, 2-3
massa e, 1, 2, 3
perda de energia por partículas carregadas segundo a física clássica, *1*
perda de energia por partículas carregadas segundo a física quântica, *1*
potencial, 1-2
psíquica, 1
química, 1-2
térmica, 1-2
energia cinética, 1-2
energia escura, 1, 2-3
energia potencial, 1-2
energia psíquica, 1
energia química, 1-2
energia térmica, 1-2
enigma(s):
código alemão Enigma, 1
do determinismo newtoniano, 1, 2-3
problemas de dois enigmas de medição, 1-2
ver também enigma quântico

enigma quântico, 1-2
consciência e, 1-2
decoerência e, 1-2
descrição da teoria quântica do, 1-2
interpretação da informação quântica do, 1-2
interpretação da lógica quântica do, 1
interpretação de Bohm do, 1-2, 3
interpretação de Copenhague do, 1
interpretação de Copenhague extrema do, 1-2
interpretação de Ithaca do, 1-2
interpretação dos muitos mundos do, 1-2, 3
interpretação GRW do, 1-2
interpretação transacional do, 1
mostrada experimentalmente, 1, 2
no experimento da dupla fenda, 1
quantumenigma.com, 1
EPR *ver* Einstein, Podolsky e Rosen, artigo
equação de onda de Schrödinger, 1-2
equação universal, 1
escala atômica, objetos de, 1
escala grande, objetos de:
fenômenos quânticos para, 1, 2-3, 4, 5
realidade física de, 1-2
Universo em grande escala, 1-2
escala pequena, objetos de, fenômenos quânticos para, 1-2, 3, 4

escolha retardada, experimento da, de Wheeler, 1-2, 3
escritório de patentes na Suíça e Einstein, 1-2, 3
ESP *ver* percepção extrassensorial
espaço:
  em expansão, 1-2
  e tempo, 1, 2
espelhos:
  experimento com espelho e pares de caixas, *1*
  ondas de luz refletidas de um lado a outro entre, 1-2, *3*
  pesadamente macroscópicos, 1
  semitransparentes, 1, 2, 3
espelhos pesadamente macroscópicos, 1
espelhos semitransparentes, 1, 2, 3
"Espera-se que artigo de revista científica sobre ESP provoque indignação" (*New York Times*), 1
estado excitado dos átomos, 1
estado fundamental dos átomos, 1
estrelas em explosão, 1
éter, 1
Eug Ahne Poc, 1-2, 3, 4, 5-6, 7, 8
evaporação de buracos negros, 1-2
Everett, Hugh, 1, 2-3
evidência:
  circunstancial, 1, 2, 3
  direta, 1
  objetiva da consciência, 1-2

evidência direta, 1

evidência objetiva da consciência, 1-2

evolução, 1

expansão do Universo, 1, 2-3

experimentos mentais:

  Alice e Bob, 1-2, 3-4, *5*, 6-7, 8-9, 10-11

  fóton na caixa, 1-2

  microscópio de Heisenberg, 1, 2-3, *4*

  percepção da cor, 1

  relógio na caixa, 1, *2*

  ver também gato na caixa, experimento mental do

experimentos não feitos, predição para, 1, 2

Fapp *ver* para todos os propósitos práticos

Fapptrapp, 1, 2

Faraday, Michael, 1-2, *3*

Feynman, Richard, 1

fibra óptica, 1, 2

filosofia,

  de Aristóteles, 1-2

  especulativa, 1

  natural, 1

  védica, 1

física:

  consciência e, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7-8

livre-arbítrio e, 1-2
prêmios Nobel de, 1, 2
teoria quântica como base de toda a, 1, 2, 3-4, 5
ver também física clássica; mecânica quântica
Física (Aristóteles), 1, 2
física clássica, 1-2, 3-4
consciência e, 1, 2
livre-arbítrio e, 1
perda de energia por partículas carregadas segundo a, *1*
previsões da, 1-2, *3*, 4
realidade física e, 1-2, 3
teoria quântica e, 1-2
físicos e consciência, 1-2
fissão, 1
flexão do pulso, experimento da, 1-2
fontes de ondas separadas por mais/menos de um comprimento de onda, *1*
força forte, 1
força fraca, 1
força quântica, 1
forças gravitacionais, 1, 2
fótons, 1-2, 3
cascata de dois fótons, *1*
correlações de, 1, 2, 3
detectores de, 1-2
detectores macroscópicos de fótons, 1-2

fóton na caixa, experimento mental do, 1-2
fótons polarizados aleatoriamente ordenados por um polarizador, *1*
gêmeos, 1-2, *3*, 4, 5-6, 7-8, 9, 10
hipótese do fóton para a luz, de Einstein, 1-2, 3-4, 5, 6-7
modelo de fótons-tracinhos e polarizador oval, *1*
padrões de interferência, 1, 2
polarizados, 1, 2-3, 4
polarizados paralelamente, 1-2
polarizados perpendicularmente, 1-2
pulsos de fóton único, 1
ricocheteio de um fóton num átomo, *1*
fótons aleatoriamente polarizados ordenados por um polarizador, *1*
fótons polarizados, 1, 2-3, 4
fótons polarizados paralelamente, 1-2
fotossíntese, 1-2
fotossistemas, 1
Franklin, Benjamin, 1
Freud, Sigmund, 1, 2, 3, 4
função de onda:
como série de cristas ou crista única, *1*
de átomos, 1-2, 3-4, 5-6, 7, *8*
interpretação de Copenhague da probabilidade da, 1-2, 3
quadrado absoluto da, 1
uma função de onda e sua ondulatoriedade, *1*
futuro:

consequências no, 1
de aplicações tecnológicas, 1-2
previsões do, 1, 2

galáxias, 1-2
Galileu Galilei, 1, 2-3, *4*, 5
Aristóteles e, 1-2, 3
gato na caixa, experimento mental do, 1, 2, 3, 4-5, *6*, 7
charge do cão sobre, *1*
consciência e, 1
contadores Geiger no, 1-2, 3
estados de superposição no, 1-2, 3-4
gato como observador no, 1-2
resposta ao, 1-2
Gell-Mann, Murray, 1, 2, 3
gêmeos, paradoxo dos, 1
gêmeos idênticos, analogia dos, 1-2
geometrias espaço-tempo, 1, 2
Ghirardi, Rimini e Weber (GRW), interpretação, do enigma quântico, 1-2
gigantes vermelhas, 1
giromagnética, razão, de elétrons, 1
Gödel, Kurt, 1
Grande Colisor de Hádrons (LHC), 1
Grande Máquina, o Universo como a, 1, 2
Grande Peste, 1

gravidade, 1-2, 3
da Lua, 1
detecção sensível de ondas gravitacionais, 1
Einstein e, 1
quântica, 1-2, 3
gravidade quântica, 1-2, 3
Grécia, Idade de Ouro da, 1, 2
grega, ciência, 1, 2-3
Grupo de Pessoas Racionais e de Mente Aberta (Gruprama), 1-2
Gruprama *ver* Grupo de Pessoas Racionais e de Mente Aberta
Guerra Mundial, Primeira, 1, 2
Guerra Mundial, Segunda, 1, 2
Gurdjieff, G.I., 1

Halley, Edmund, 1-2
Hameroff, Stuart, 1
Hamlet (Shakespeare), 1
Hartle, James, 1
Hawking, radiação de, 1
Hawking, Stephen, 1, 2, 3, 4
Haynes, John-Dylan, 1
Heisenberg, experimento mental do microscópio de, 1, 2-3, *4*
Heisenberg, princípio da incerteza de, 1-2
fugindo do, 1-2, *3*
livre-arbítrio e, 1

Heisenberg, Werner, 1-2, 3, 4-5, 6
hélio, 1, 2, 3
hidrogênio, átomos de:
    elétrons nos, 1, 2, 3, 4-5
    energia química em, 1-2
    núcleos dos, 1-2
    ondulatoriedade dos três níveis mais baixos dos, *1*
hierarquia da explicação científica, *1*, *2*
hieróglifos, 1
Hiley, Basil, 1
Hipótese espantosa, A (Crick), 1
história, criação de, 1-2
    no experimento da dupla fenda, 1-2
Hobson, J.A., 1
Hoffman, Donald, 1-2
horizonte de eventos, 1
horóscopos, 1
Hoyle, Fred, 1-2
Hubble, Edwin, 1
Humphrey, Nicholas, 1

IA *ver* inteligência artificial
IBM, 1, *2*
    Deep Blue, computador, 1
idealismo (filosofia), 1-2

Igreja, ensinamentos da, 1-2, 3

Igus (*information gathering and utilizing system* – sistema de coleta e utilização de informação), 1

Iluminismo, 1

ilusões:

consciência como, 1, 2

livre-arbítrio como, 1, 2, 3-4, 5

ópticas, 1

realidade física como, 1

ilusões ópticas, 1

imagem, precisão de, 1

imagem por ressonância magnética (IRM), 1, 2-3

tecnologia IRMf, 1

imagem por ressonância magnética funcional (IRMf), 1, 2

imagem por ressonância magnética nuclear, 1, 2

impurezas, átomos de, 1

incerteza, princípio da, 1-2, 3-4

incompletude, da teoria quântica, 1, 2, 3-4

indução e livre-arbítrio, 1-2

inflação, teorias de, 1-2

influências:

analogia de influências não físicas, 1

instantâneas, 1-2

influências não físicas, analogia de, 1

influenza, vírus, 1

informação, 1

aspectos físicos e fenomenológicos da, 1-2
interpretação da informação quântica, 1-2
informação quântica, interpretação da, do enigma quântico, 1-2
infravermelha, luz, 1-2
instantâneas, influências, 1-2
Instituto de Ciências Fotônicas de Barcelona, 1
Instituto Max Planck de Física Gravitacional, 1, 2
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (EUA), 1
Instituto Nacional de Nanotecnologia (Canadá), 1
inteligência artificial, 1, 2
interferência, padrões de:
átomos em, *1*
comportamento ondulatório e, 1-2, *3*, *4*, 5
em demonstrações com bolinhas de gude, 1-2
experimento da dupla fenda, 1-2, *3*
experimentos sobre, 1, 2, 3-4, *5*, 6-7
fótons e, 1
interferência de elétrons, 1-2
na interpretação de Copenhague, 1-2, 3, 4
"Interferência de onda de De Broglie em pequenas rochas e vírus vivos, A" (capítulo de livro de Clauser), 1
internet, 1
intuição, 1, 2, 3, 4
inversão do tempo, 1
IRM *ver* imagem por ressonância magnética
IRMf *ver* imagem por ressonância magnética funcional

Ithaca, interpretação de, do enigma quântico, 1-2

Jauch, J.M., 1, 2
Jeans, sir James, 1
jogo das cascas de noz, exemplo do, 1-2, *3*, 4, 5-6
Johnson, Samuel, 1
Jordan, Pascual, 1, 2
Jornada nas Estrelas (série de TV), 1

Kasparov, Garry, 1
Kelvin, lorde, 1, 2
Kepler, Johannes, 1, 2
Koch, Christof, 1

laissez-faire, capitalismo do, 1
lambda (l), tudo existente no passado, 1
Langevin, Paul, 1
lasers, 1-2, 3, 4
Leggett, Anthony, 1
lei universal do movimento de Newton, 1-2, 3, *4*, 5, 6
LHC *ver* Grande Colisor de Hádrons
Libet, Benjamin, 1-2
Linde, Andrei, 1, 2
lítio, 1
livre-arbítrio, 1-2, 3
    como ilusão, 1, 2, 3-4, 5

consciência e, 1-2, 3, 4, 5, 6
determinismo e, 1, 2-3
Deus e, 1
em demonstrações com bolinhas de gude, 1, 2-3
física clássica e, 1
física e, 1-2
indução e, 1-2
princípio da incerteza de Heisenberg e, 1
realidade física e, 1
Lloyd, Seth, 1
Loesser, Frank, 1
lógica quântica, interpretação da, do enigma quântico, 1
Lua, gravidade da, 1
luz:
comportamento ondulatório da, 1-2, *3*, 4-5, 6-7, 8-9
cores da, 1
de alta frequência, 1
desvio para o vermelho da, 1-2
energia de elétrons ejetados versus frequência da luz, *1*
experimentos de dupla fenda com, 1-2, *3*, *4*
infravermelha, 1-2
luz interior da consciência, 1
não polarizada, 1-2
ondas de luz refletidas de um lado a outro entre dois espelhos, 1-2, *3*
polarizada vertical e horizontalmente, 1-2, *3*

teoria das ondas eletromagnéticas, 1, 2, 3
ultravioleta, 1, 2-3, 4, 5
velocidade da, 1-2, 3-4, 5-6, 7, 8-9
violeta, 1
ver também partícula, teoria da luz como
luz de alta frequência, 1
luz interior, da consciência, 1
luz não polarizada, 1-2
luz polarizada, vertical e horizontalmente, 1-2, *3*

Malus, lei de, 1
marés, 1
Marx, Karl, 1
maser, dispositivo, 1
massa e energia, 1, 2, 3
matéria:
escura, 1-2
natureza atômica da, 1, 2
ondas de, 1-2, 3-4, 5
matéria escura, 1-2
materialismo, 1-2, 3
Mathematical Foundations of Quantum Mechanics, The (Von Neumann), 1
Maxwell, equações de, 1
Maxwell, James Clerk, 1, 2
mecânica quântica:

aleatoriedade e, 1, 2, 3
aplicações tecnológicas da, 1-2
consequências sociais da, 1
interpretação psicológica da, 1-2
misticismo e, 1-2
natureza probabilística da, 1, 2-3
negação da realidade física, 1
significado da, 1-2, 3-4, 5-6, 7
teoria quântica e, 1
universalidade da, 1
medição, problema(s) da, 1, 2
dois enigmas do, 1-2
posição do objeto e, 1
medieval, astronomia, 1-2
mente-cérebro, dualismo, 1
Mermin, David, 1
Metafísica (Aristóteles), 1, 2
metafísica, 1
experimental, 1-2
método científico, 1, 2, 3
método experimental, 1-2
Michelson, Albert, 1
micro-ondas, radiação de, 1
amplificada, 1
cósmica de fundo, 1

microscopia de emissão de campo, 1
microscópio de tunelamento com varredura, 1, 2
Millikan, Robert, 1, 2
Mind and Matter (Schrödinger), 1
misticismo e mecânica quântica, 1-2
modelo de phótons-tracinhos e polarizador oval, *1*
modelo orbital dos núcleos, 1-2, 3, *4*, 5-6
momento angular, 1
Moore, Gordon, 1
Moore, lei de, 1
Morley, Edward, 1
movimento:
    lei universal do, 1-2, 3, *4*, 5, 6
    planetário, 1-2, 3-4, 5, 6-7
muitos mundos, interpretação dos, do enigma quântico, 1-2, 3
    problema do observador e, 1-2
multiverso, 1
mundo supradeterminista, 1, 2

nanoeletromecânicos, sistemas (Nems, na sigla em inglês), 1
nanotecnologia, 1
natureza:
    aleatoriedade da, 1, 2-3, 4
    aspecto probabilístico da, 1
    leis fundamentais da, 1-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

racionalidade da, 1, 2
simetria na, 1, *2*
natureza atômica da matéria, 1, 2
natureza ondulatória dos elétrons, 1, 2
nazismo, 1
negação da realidade física pela mecânica quântica, 1
Nems *ver* nanoeletromecânicos, sistemas
neurológicos, processos, 1, 2-3
neurônio do senso de consciência, 1
Newton, Isaac, 1, *2*
desenho do canhão sobre a montanha de, *1*
enigma do determinismo newtoniano, 1, 2-3
legado de, 1-2
lei universal do movimento e, 1-2, 3, *4*, 5, 6
Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, 1-2
teoria da luz como partícula e, 1-2, 3
newtoniana, visão de mundo, 1, 2, 3-4, 5-6, 7, 8, 9
Newtonianism for Ladies, 1
níquel cristalizado, demonstração com, 1
níquel oxidado, 1
nitreto de silício, membrana de, 1
Nobel, prêmios, 1
de Bohr, 1
de De Broglie, 1
de Einstein, 1

de Gell-Mann, 1
de Leggett, 1
de Física, 1, 2
de Weinberg, 1
de Wigner, 1
de Wilczek, 1
Nova (série de TV), 1
núcleo:
de hélio, 1
de hidrogênio, 1
modelo orbital do, 1-2, 3, *4*, 5-6
de tório, 1
de urânio, 1-2
números aleatórios, gerador de, 1

O que é vida? (Schrödinger), 1
observação(ões), 1-2
aleatoriedade da, 1-2
colapso da ondulatoriedade e, 1-2, 3-4, 5-6, 7-8
consciência e, 1-2, 3-4, 5
criação por, 1-2, 3-4, 5, 6, 7-8, 9-10, 11-12
emaranhamentos como, 1
interpretação Fapp, 1-2
neutra em termos de teoria quântica, 1
por contadores Geiger, 1, 2, 3-4, 5

realidade física e, 1, 2, 3, 4
teoria quântica e, 1
observações neutras em termos de teoria quântica, 1
observador, problema do:
Bohm e, 1, 2
consciência e, 1
experimento da dupla fenda e, 1
experimento de pares de caixas e, 1
interpretação dos muitos mundos e, 1-2
solução de Copenhague para, 1
Omnès, Roland, 1
ondas sonoras, 1
ondículas, 1
ondulatoriedade, 1-2
colapso da, 1-2, 3, 4-5, 6, 7-8, 9-10, 11
como probabilidade, 1, 2-3, 4-5
dos três estados mais baixos do hidrogênio, *1*
função de onda e sua, *1*
interpretação aceita da, 1-2
interpretação de Schrödinger da, 1-2, *3*
partículas alfa e, 1-2, *3*
posição do objeto e, 1
ondulatório, comportamento:
da luz, 1-2, *3*, 4-5, 6-7, 8-9
fontes de ondas separadas por mais/menos que um comprimento de onda, *1*

padrões de interferência e, 1-2, *3*, *4*, 5
onipotência de Deus, 1, 2
óptica, 1
OR *ver* redução objetiva
órbitas elípticas dos planetas, 1, 2, 3
organismos vivos em estados de superposição, 1-2
Organização das Nações Unidas, 1
Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (Cern), 1-2
ornitorrinco, 1
Oxford English Dictionary, 1

pacotes de ondas, 1-2, 3
espalhadas, 1
pares de caixas, experimentos com:
bolinhas de gude, demonstrações com, 1-2, *3*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9*
consciência e, 1-2
espelho e par de caixas, experimento com, *1*
experimento do casal na choupana, 1-2, 3, 4
interpretação de Copenhague, 1-2, *3*, 4-5, 6
problema do observador e, 1
versão do experimento da dupla fenda, 1-2, *3*
ver também gato na caixa, experimento mental do
para todos os propósitos práticos (Fapp), 1, 2
interpretação Fapp de observação, 1-2
parafenômenos, 1-2

Particle Physics and Inflationary Cosmology, (Linde), 1
partícula, teoria da luz como, 1-2, 3
colisões de partículas em altas energias, 1
"comprimento de onda de De Broglie" de uma partícula, 1, 2, 3, 4, 5
perda de energia por partículas carregadas segundo a física clássica, *1*
perda de energia por partículas carregadas segundo a física quântica, *1*
partículas alfa, 1-2, *3*, 4-5
ondulatoriedade, 1-2, *3*
passado, mudando o, 1
pêndulos, 1, 2
Penrose, Roger, 1, 2, 3, 4-5, 6, 7
Penrose-Hameroff, abordagem de, 1-2
pensamentos observadores, analogia dos, 1
percepção extrassensorial (ESP), 1, 2-3
perpendicular, polarização, de fótons, 1-2
perturbação semântica, doutrina da, 1
PET *ver* tomografia por emissão de pósitrons
Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Newton), 1-2
phótons (fótons) gêmeos, 1-2, *3*, 4, 5-6, 7-8, 9, 10
polarização particular para, 1-2, 3
realidade física de, 1-2
taxa de descombinação para, 1-2
phótons-tracinhos, experimentos de, *1*
pigmentos, tecnologia com pontos quânticos, 1
piloto de fóton, 1

Planck, constante de, 1, 2, 3, 4
Planck, Max, 1, *2*
Einstein e, 1
histórico, 1-2
radiação térmica e, 1-2
poder computacional, 1
Podolsky, Boris, 1, 2, 3
EPR e, 1-2, *3*, 4, 5-6
polarização, eixo de, 1-2, 3, 4, 5-6, 7
polarização de partículas:
de fótons, 1-2
de phótons gêmeos, 1-2, 3
polarizadores, 1-2, 3
fótons aleatoriamente polarizados ordenados por um polarizador, *1*
modelo de phótons-tracinhos e polarizador oval, *1*
rotação de, 1-2
polos norte e sul de átomos, 1, 2
pontos quânticos, 1
Pope, Alexander, 1, 2
posição do objeto:
ondulatoriedade e, 1
probabilidade da, 1-2
problema da medição e, 1
posição *ver* posição do objeto
potencial quântico, 1-2

precognição, 1-2

predador-presa, relação, 1-2

predições:

da física clássica, 1-2, *3*, 4

da teoria quântica, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7, 8-9

de cometas, 1, 2

de experimentos não feitos, 1, 2

do futuro, 1, 2

testáveis, 1, 2, 3, 4, 5-6

predições testáveis, 1, 2, 3, 4, 5-6

Preskill, John, 1

Principia ver Philosophiae Naturalis Principia Mathematica

princípio antrópico, 1-2

prismas, 1-2

probabilidade:

aspecto probabilístico da natureza, 1

bayesiana, 1

da posição do objeto, 1-2

interpretação de Copenhague da função de onda, 1-2, 3

natureza probabilística da mecânica quântica, 1, 2-3

natureza probabilística da ondulatoriedade, 1, 2-3, 4-5

objetiva, 1, 2-3

quântica, 1, 2-3, 4, 5, 6

ver também probabilidade clássica

probabilidade clássica, 1-2, 3-4

aspecto subjetivo da, 1-2, 3, 4-5, 6
probabilidade objetiva, 1, 2-3
probabilidade quântica, 1, 2-3, 4, 5, 6
problema difícil da consciência, 1-2
processamento paralelo, analogia do, 1-2
propriedade subjetiva da probabilidade clássica, 1, 2, 3-4, 5
proteínas, 1
prótons:
força eletromagnética e, 1, 2
quarks em, 1, 2-3
proximidade, espoleta de, 1
pseudociência, 1-2, 3-4, 5
psicocinese, 1
psicofísicos, princípios, 1
psicologia, 1
behaviorista, 1, 2-3
interpretação psicológica da mecânica quântica, 1-2
Ptolomeu de Alexandria, 1-2
pudim de passas, modelo atômico do, 1-2, *3*
pulsos de fóton único, 1

quadrado absoluto da função de onda, 1
"qual caixa?", versão do experimento da dupla fenda, 1-2, 3, 4, 5
quanta, 1-2
quântica, mecânica *ver* mecânica quântica

quântico, enigma *ver* enigma quântico
quânticos, fenômenos:
demonstração de, 1, 2, 3, 4
em biologia, 1-2, 3, 4
para objetos de escala pequena, 1-2, 3, 4
para objetos grandes, 1, 2-3, 4, 5
significado dos, 1-2, 3-4
tecnologia IRM e, 1
transistores e, 1-2
quânticos, saltos, 1-2, 3
Bohr, N. e, 1-2
Schrödinger, briga de, com, 1-2, 3
quantização espacial, 1
quants, 1
“Quantum theory without observers”, 1
quarks, 1, 2-3
Quem somos nós? (filme), 1, 2, 3

racionalidade da natureza, 1, 2
radar, 1
radiação cósmica de fundo, 1
radiação térmica, 1-2, *3*
elétrons e, 1-2, 3-4
radioastronomia, 1
radiobaliza, analogia da, 1

realidade:
    além da teoria quântica, 1-2, 3-4, 5
    independente, 1, 2, 3
    realidades inconsistentes, 1
    separabilidade e, 1-2
    ver também realidade física
realidade criada pelo observador, analogia da, 1
realidade física, 1-2
    analogias à, 1-2
    como ilusão, 1
    condição para existência da, 1
    consciência e, 1
    de correlações, 1-2
    de fótons gêmeos, 1-2
    de objetos de escala grande, 1-2
    desigualdade de Bell e, 1-2
    doutrina da perturbação física, 1
    em demonstrações com bolinhas de gude, 1-2
    física clássica, 1-2, 3
    livre-arbítrio e, 1
    negação da, pela mecânica quântica, 1
    objetos de escala atômica e, 1-2
    observação e, 1, 2, 3, 4
realidade independente, 1, 2, 3
realidades inconsistentes, 1

realismo, 1-2
científico, 1
ingênuo, 1
redução, 1-2
consciência e, 1
hierarquia da explicação científica, *1*, *2*
objetiva, 1
redução objetiva (OR), 1-2
reductio ad absurdum — redução ao absurdo, 1
Rees, Martin, 1, 2
relatividade, 1, 2-3, 4, 5
especial, 1, 2-3, 4, 5
geral, 1, 2, 3-4
relatividade especial, 1, 2-3, 4, 5
relatividade geral, 1, 2, 3-4
teoria quântica e, 1
relógio na caixa, experimento do, 1, *2*
relógio, visão do mundo como um, 1-2, 3
Renascença, ciência da, 1-2, 3
resistência do ar, 1
Revolução Americana, 1
Revolução Industrial, 1
revolução quântica, 1, 2
Rhob, no experimento do casal na choupana, 1-2
ricocheteio de um fóton num átomo, *1*

robôs:
argumento do robô, 1-2
consciência e, 1, 2-3
Rosen, Nathan, 1
EPR e, 1-2, *3*, 4, 5-6
Ross, Mary, 1
Rutherford, Ernest, 1-2
modelo atômico de, *1*

sabedoria convencional, além da, 1-2
Santa Inquisição, 1-2, 3
Schrödinger, equação de, 1, 2-3, 4, 5, 6, 7
Schrödinger, Erwin, 1, *2*
Bohr, N., e, 1-2, 3
equação de onda de, 1-2
histórico, 1-2
interpretação da ondulatoriedade, 1-2, *3*
interpretação de Copenhague e, 1, 2
Mind and Matter, 1
O que é vida?, 1
saltos quânticos e, 1-2, 3
ver também gato na caixa, experimento mental do
"Schrödinger's drum", 1
"Scientists supersize quantum mechanics: largest ever object put into quantum state", 1
seda esfregada, exemplo da, 1-2

senso comum, 1, 2, 3-4, 5
senso de consciência versus emaranhamentos, 1-2
separabilidade, 1-2, 3, 4-5
realidade e, 1-2
Shakespeare, William, 1
Shannon, Claude, 1
silício, 1-2
simetria na natureza, 1, *2*
Singer, Isaac Bashevis, 1
singularidades, 1-2
sistema de coleta e utilização de informação *ver* Igus
sistema solar, 1, 2, 3
sistemas macroscópicos, 1-2, 3-4, 5-6, 7, 8-9
detectores macroscópicos de fótons, 1-2
espelhos pesadamente macroscópicos, 1
estado de superposição, 1
objetos emaranhados, 1, *2*
sistemas microscópicos, 1, 2, 3, 4-5, 6-7
Skinner, B.F., 1, 2
Smith, Adam, 1
Sociedade Americana de Física, 1
sociologia, 1
sódio, experimento com, 1
Sol:
central, 1-2, 3

superfície do, 1
solipsismo, 1-2, 3, 4, 5, 6, 7
Solvay, conferência de, 1, 2, *3*
“Some quantum weirdness in physiology”, 1
Stapp, Henry, 1, 2, 3-4
supercondutividade, 1-2, 3
supernovas, 1, 2
superposição, estados de:
colapso, 1-2
de fótons polarizados, 1-2
em computadores quânticos, 1-2
em demonstrações com bolinhas de gude, 1
em tecnologia de IRM, 1
explicações de contador Geiger e, 1-2
macroscópicos, 1-2
no experimento com sódio, 1
no experimento mental do gato na caixa, 1-2, 3-4
organismos vivos em, 1-2

tardígrados, 1
tela de cintilação, 1
tempo, 1
espaço e, 1, 2
experimentos de viagem no tempo, 1
geometrias espaço-tempo, 1, 2

inversão do, 1

teoria, 1-2

teoria de tudo, 1-2

teoria quântica:

absurdo da, 1-2, 3-4

ações fantasmagóricas e, 1-2

como base de toda a física, 1, 2, 3-4, 5

completude da, 1-2

consciência e, 1-2, 3, 4, 5

cosmologia da, 1, 2, 3, 4-5, 6

duas teorias quânticas da consciência, 1-2

enigma quântico descrito na, 1-2

física clássica e, 1-2

incompletude da, 1, 2, 3-4

mecânica quântica e, 1

observação e, 1

predições da, 1, 2, 3-4, 5, 6, 7, 8-9

propriedade determinística da, 1

relatividade geral e, 1

teoria unificada, 1

teorias das cordas, 1, 2

testes experimentais de ações fantasmagóricas, 1-2

teta (Q), ângulo, 1-2, 3

Thompson, Francis, 1

Thompson, J.J., 1-2

tomografia por emissão de pósitrons (PET), 1
tório, 1
“Towards quantum superpositions of a mirror”, 1
Townes, Charles, 1, 2
trajetória para nordeste como soma de trajetórias para norte e depois para leste, *1*, 2
transacional, interpretação, do enigma quântico, 1
transistores, 1-2, 3
tubulinas, 1-2
Turing, Alan, 1-2

Ulfbeck, Ole, 1
ultravioleta, luz, 1, 2-3, 4, 5
Undivided Universe, The (Bohm e Hiley), 1
universalidade da mecânica quântica, 1
Universidade Nacional da Austrália, 1
universo:
  como a Grande Máquina, 1, 2
  em grande escala, 1-2
  expansão do, 1, 2-3
  participativo, 1
urânio, 1, 2-3
ursos-d’água, 1

vácuo, tubos de, 1
vagão de trem, analogia do, 1-2, 3

variáveis ocultas, 1-2, 3, 4-5
locais, 1
vedanta, 1
védica, filosofia, 1
velocidade da luz, 1-2, 3-4, 5-6, 7, 8
violeta, luz, 1
violino, comparação com, 1
visão, 1
vodu, 1, 2
Voltaire, 1
Von Neumann, cadeia de, 1
Von Neumann, John, 1-2, 3-4, 5

Weinberg, Steven, 1
Wheeler, John, 1, 2
Big Bang e, *1*, 2
consciência e, 1-2
escolha retardada, experimento da, 1-2, 3-4
Wigner, Eugene, 1-2, 3, 4, 5
Wilczek, Frank, 1
Wittgenstein, Ludwig, 1

Young, Thomas, 1-2, 3

Zeilinger, Anton, 1, 2
Zenão, efeito quântico, 1

zero absoluto, 1
Zurek, W.H., 1

MANET×DEGAS
MATISSE×PICASSO
POLLOCK×DE KOONING
FREUD×BACON
A ARTE DA RIVALIDADE
QUATRO AMIZADES QUE MUDARAM A ARTE MODERNA
SEBASTIAN SMEE
Vencedor do prêmio Pulitzer
ZAHAR

A arte da rivalidade

Smee, Sebastian
9788537816783
332 páginas

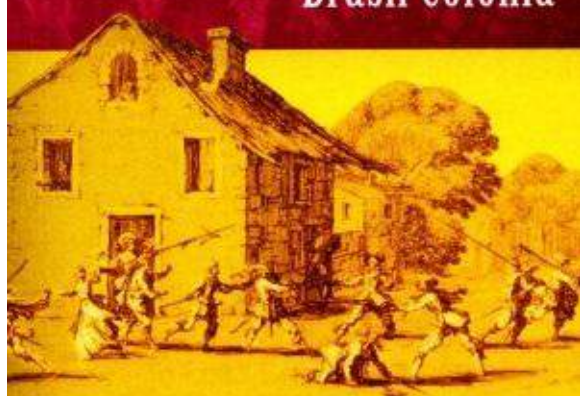
[Compre agora e leia]

A história de quatro amizades extraordinárias que transformaram a arte moderna

Oito artistas geniais e quatro relacionamentos que mudaram os caminhos da arte. Intensas, conturbadas e competitivas, essas amizades modificaram também os artistas envolvidos, impulsionando cada um deles a novos patamares criativos.
Vencedor do Prêmio Pulitzer, o crítico Sebastian Smee acompanha Édouard Manet e Edgar Degas, Henri Matisse e Pablo Picasso, Jackson Pollock e Willem De Kooning, Lucian Freud e Francis Bacon – e todos aqueles que os cercavam – por Paris, Nova York e Londres, desde o séc. XIX e através do XX, traçando um painel revelador da arte moderna.

"Arrebatador! Acabamos o livro loucos por saber ainda mais sobre arte." The New York Times
"A perfeita combinação de gosto artístico com compreensão da natureza humana em uma prosa cristalina." The New Yorker
"Smee escreve belamente. Irresistível." The Sunday Times
"Bacon gostava de dizer que seus retratos buscavam capturar 'as pulsações da pessoa'. Revelando esses extraordinários criadores como os inestimáveis catalisadores que eles também foram, Smee transmite

exatamente o mesmo a cada página. Sua brilhante biografia de grupo é única.” The Atlantic
"Um trabalho ambicioso e impressionante, escrito de forma soberba.” Publishers Weekly

JORGE ZAHAR EDITOR
Rebeliões no
Brasil Colônia
LUCIANO FIGUEIREDO
Descobrindo o Brasil

Rebeliões no Brasil Colônia

Figueiredo, Luciano
9788537807644
88 páginas

Compre agora e leia

Inúmeras rebeliões e movimentos armados coletivos sacudiram a América portuguesa nos séculos XVII e XVIII. Esse livro propõe uma revisão das leituras tradicionais sobre o tema, mostrando como as lutas por direitos políticos, sociais e econômicos fizeram emergir uma nova identidade colonial.

Compre agora e leia

razões da crítica
LUIZ CAMILLO OSORIO
arte+
JORGE zahar EDITOR

Razões da crítica

Osorio, Luiz Camillo
9788537807750
70 páginas

Compre agora e leia

Entre tudo poder ser arte e qualquer coisa de fato ser arte reside uma diferença fundamental. Esse livro discute o papel e os lugares da crítica na atualidade, bem como sua participação no processo de criação e disseminação de sentido, deslocando-a da posição de juiz para a de testemunha.

Compre agora e leia

CAROLINE WEBER
RAINHA DA MODA
Como Maria Antonieta se vestiu para a Revolução
Livro notável, New York Times
Melhor livro do ano, Washington Post Book World
ZAHAR

Rainha da moda

Weber, Caroline
9788537805039
470 páginas

[Compre agora e leia]

Maria Antonieta revolucionou a moda de seu tempo. Mais do que isso, revolucionou seu tempo através da moda. Do traje de montaria masculino aos excêntricos penteados, dos vestidos cravejados de brilhantes ao modesto estilo pastoril, suas roupas revolucionaram o rigoroso cerimonial da corte de Luís XVI e ajudaram a desfazer a aura de sacralidade que envolvia a monarquia, acirrando os ânimos da Revolução. Nessa obra reveladora e original, repleta de belas ilustrações, a autora adota um olhar diferente de qualquer outra biografia já publicada sobre a polêmica rainha francesa. E mostra como a moda foi ao mesmo tempo o meio de afirmação de Maria Antonieta e o caminho para seu trágico fim.

[Compre agora e leia]